



Universidade de Aveiro
2011

Departamento de Electrónica,
Telecomunicações e Informática

DIOGO MIGUEL MOURA DOS SANTOS ALMEIDA **SISTEMA DE REALIDADE AUMENTADA ÁUDIO**



Universidade de Aveiro
2011

Departamento de Electrónica,
Telecomunicações e Informática

**DIOGO MIGUEL
MOURA DOS
SANTOS
ALMEIDA**

SISTEMA DE REALIDADE AUMENTADA ÁUDIO

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor José Vieira e do Prof. Doutor Guilherme Campos, ambos Professores Auxiliares do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro.

Júri

Presidente

Prof. Doutor António Manuel Melo de Sousa Pereira

Professor Catedrático do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Doutor José Manuel Neto Vieira

Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António Guilherme Rocha Campos

Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Octávio José Patrício Fernandes Inácio

Professor Adjunto da Escola Superior de Música, Artes e Espectáculo do Instituto Politécnico do Porto

Agradeço aos meus pais pelo apoio, motivação, compreensão e paciência sempre demonstradas que me ajudaram a concluir o meu percurso académico com sucesso. Agradeço também à minha irmã, pelo facto de todos dias me fazer sorrir e por todas as palavras de motivação sempre prontas. Agradeço à minha avó Laura pelo carinho e preocupação sempre demonstrados, e pelo apoio constante ao longo de todos estes anos. Agradeço também à minha tia Margarida pelo constante carinho, atenção e apoio. Agradeço a toda a minha família que me apoiou e motivou incessantemente. Agradeço à minha namorada pela paciência, apoio e carinho, que sempre me ajudou e acompanhou em todos os momentos.

Agradeço a todos os amigos que me apoiaram e pelos bons e inesquecíveis momentos que me proporcionaram ao longo destes cinco anos.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Doutor José Vieira, e ao meu coorientador, Prof. Doutor Guilherme Campos, pelo apoio, colaboração e compreensão ao longo de todo este trabalho.

Agradeço também aos meus colegas de laboratório, Sérgio Lopes e Daniel Albuquerque, pelo apoio prestado e pelas contribuições para a realização deste trabalho.

Palavras-chave

Realidade Aumentada, Áudio, Museu, Turismo, Auralização, Localização, Orientação, Ultra-sons, Giroscópio, Acelerómetro, Magnetómetro, Headphones.

Resumo

Considerando aplicações de realidade aumentada áudio, desenvolveu-se uma versão de demonstração de um sistema de auralização integrando detecção automática da posição e orientação da cabeça do utilizador. A posição é determinada através do cálculo das distâncias entre um emissor de ultra-sons transportado pelo utilizador e receptores fixos distribuídos na sala. A orientação da cabeça é obtida através de um sistema comercial de orientação inercial a 3 eixos (InertiaCube3). Para a auralização foram utilizadas bases de dados HRTF do MIT. O programa de controlo foi escrito em MATLAB. O sistema é gerido a partir de um computador, utilizando uma placa Data Translation como interface. Com este sistema, o utilizador pode caminhar livremente na sala e localizar a origem de fontes sonoras virtuais em tempo real.

No final do trabalho, foram efectuados testes de avaliação objectiva e subjectiva. Nos primeiros, foram realizadas diversas medidas de maneira a avaliar a precisão dos sistemas implementados. Os testes de avaliação subjectiva foram efectuados com a ajuda de alguns voluntários, que interagiam com o sistema seguindo um protocolo previamente criado. Assim foi possível obter informações relativamente à influência do sistema com o utilizador final, bem como verificar quais os pontos a melhorar em trabalhos futuros.

Este trabalho originou um artigo que foi submetido no âmbito do 13º Encontro da "Associação Portuguesa de Engenharia de Áudio" (APEA). O artigo foi aceite e a apresentação do trabalho foi feita aos participantes.

Keywords

Audio Augmented Reality, Museum, Tourism, Auralization, Location, Orientation, Ultrasound, Gyroscope, Accelerometer, Magnetometer, Headphones.

Abstract

Considering audio augmented reality applications, a demo version was developed of an auralization system featuring automatic detection of user position and head orientation. The position is determined by calculating the distances between an ultrasound transmitter carried by the user and fixed receivers distributed in the room. Head tracking is based on a commercial 3-DOF inertial orientation system (InertiaCube3). HRTF data from MIT was used for auralization. The control program was written in MATLAB. The system is supervised from a host computer through a Data Translation board. With this system, the user is able to walk freely within the room and locate virtual sound sources in real time.

To evaluate the developed system both objective and subjective tests were performed. With the first ones, it was possible to get the precision of orientation and location systems. The subjective tests were conducted with the help of some volunteers who interacted with the system by following a previously established protocol. It was then possible to get important information regarding the interaction between the system and the final user. Thus it was possible to obtain information regarding the influence of the system with the end user, as well as verify which points to improve in future work.

An article was written in order to submit it to the 13th Encounter of "Associação Portuguesa de Engenharia de Áudio" (APEA). The article was accepted and presented to the public.

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento do trabalho	1
1.2.	Organização da tese	2
2.	Realidade Aumentada Áudio.....	3
2.1.	Sistemas de Realidade Aumentada Áudio	4
2.2.	Auralização	5
2.3.	Localização/Orientação.....	7
2.3.1.	Localização XYZ.....	7
2.3.2.	Orientação.....	9
3.	Sistema de Realidade Aumentada Áudio AAR317	11
3.1.	Sistema Ideal	11
3.1.1.	Sistema de Localização espacial	13
3.1.2.	Sistema de Orientação espacial	15
3.1.3.	Interface entre o utilizador e o sistema	16
3.1.4.	Armazenamento de conteúdos.....	18
3.2.	Sistema Protótipo.....	18
3.2.1.	Sistema de Localização Espacial	19
3.2.1.1.	Utilização de modulação PSK	21
3.2.1.2.	Utilização de um sinal do tipo " <i>chirp</i> "	22
3.2.2.	Sistema de Orientação Espacial	23
3.2.3.	Interface entre o utilizador e o Sistema	24
3.2.4.	Armazenamento de conteúdos.....	25
4.	Localização Espacial.....	27
4.1.	Testes iniciais.....	28

4.1.1.	Transdutores Ultra-sons.....	28
4.1.2.	Hardware utilizado	31
4.1.3.	Modulação do sinal	32
4.1.4.	Programa de para obtenção da distância e desmodulação de um sinal	34
4.1.5.	Programa de localização espacial.....	41
4.2.	Solução adoptada.....	43
4.2.1.	Hardware utilizado	43
4.2.2.	Software	44
5.	Orientação espacial.....	49
5.1.	Tipos de sensores para realização de orientação espacial	49
5.1.1.	Acelerómetros.....	50
5.1.2.	Giroscópios.....	53
5.1.3.	Magnetómetros	55
5.1.4.	Sistemas com vários sensores	57
5.2.	Solução Adoptada	59
5.2.1.	Software desenvolvido - MATLAB.....	61
5.3.	Aproximação ao sistema ideal	63
6.	Auralização	67
6.1.	Auralização utilizando diferenças de volume.....	67
6.2.	Auralização utilizando o simulador acústico	72
6.3.	Auralização utilizando HRTF	75
7.	Testes	77
7.1.	Avaliação objectiva - Testes de precisão da localização	78
7.2.	Avaliação subjectiva - Testes com voluntários.....	79
7.2.1.	Resultados do teste do programa AAR317 Orientation.....	83
7.2.2.	Resultados do teste do programa AAR317 Position	84

7.2.3.	Resultados do teste do programa AAR317 Navigation	86
8.	Conclusões e trabalho futuro	91
9.	Bibliografia	93
10.	Anexos	97
10.1.	Questionário Sessão de Testes.....	97
10.2.	Análise performance programa	99
10.2.1.	Sem melhorias no código - relatório gerado pelo MATLAB	99
10.2.2.	Com melhorias no código - relatório gerado pelo MATLAB.....	100
10.3.	Transferência de dados para o LSM303DLH através de I ² C	101

Índice de Figuras

Figura 1 - Sistema de Realidade Aumentada Vídeo (W.t.t.Future, 2011)	3
Figura 2 - Exemplo das funcionalidades do sistema TooZla (Augmented Planet, 2011)	5
Figura 3 - Medição de HRTF's num manequim KEMAR(DAVIS)	6
Figura 4 - Fonte sonora virtual emitindo um som - A percepção sonora dos dois utilizadores é diferente pois apesar de se encontrarem no mesmo local, têm uma orientação diferente relativamente à fonte sonora	9
Figura 5 - Fonte sonora virtual emitindo um som: A percepção sonora dos dois utilizadores é diferente.....	12
Figura 6 - Sistema de Realidade Aumentada Áudio Ideal	13
Figura 7 - Cálculo da posição do utilizador através de algoritmos de multilateração	14
Figura 8 - Ângulos usados para definição da orientação da cabeça (How Stuff Works, 2011).....	15
Figura 9 - Esquema a adoptar para integração do Sistema de Realidade Aumentada Áudio	16
Figura 10 - Protótipo do Sistema de Realidade Aumentada Áudio.....	19
Figura 11 - Esquema do protótipo do Sistema de Localização Espacial.....	20
Figura 12 - Data Translation DT9836S.....	21
Figura 13 - Cálculo do tempo de voo do sinal utilizado multiplexagem temporal	21
Figura 14 - Kit eZ430-RF2500 da Texas Instruments.....	24
Figura 15 - Transdutor ultra-sons Murata MA40S5	28
Figura 16 - Coluna piezo-eléctrica Kemo L10 e respectiva resposta em frequência	29
Figura 17 - Microfone Panasonic WM-61A	30
Figura 18 - Circuito de amplificação do sinal recebido pelo microfone.....	30
Figura 20 - Placa Data Translation DT9836S e a respectiva placa de melhoria.	31
Figura 19 - Placa utilizada com microfone e coluna (esquerda). Esquema do circuito da placa(direita)	31

Figura 21 - Representação dos diferentes tipos de modulação (ASK, FSK e PSK) (Arcada University of Applied Life)	33
Figura 22 - Comparação do BER para as modulações de ASK, PSK e FSK (SILVA, 2009)	34
Figura 23 - Diagrama de blocos geral do programa	34
Figura 24 - Diagrama de blocos do Modulador PSK.....	37
Figura 25 - Sinal binário emitido e respectivo sinal modulado PSK	37
Figura 26 - Experiência de transmissão de um sinal modulado PSK com dois transdutores ultrassons, um emissor e um receptor	38
Figura 27 - Diagrama de Blocos do Canal de Transmissão.....	38
Figura 28 - Diagrama de Blocos do Desmodulador e calculador de distância	39
Figura 29 - À esquerda está representado o processo de calibração. O emissor é colocado a uma determinada distância do receptor (conhecida) e mede-se o número de amostras de atraso desde o início da aquisição do sinal até à aquisição do mesmo. Com sucessivas medidas consegue-se obter uma recta que descreve a tendência do sistema. À direita encontra-se representada a situação em que se pretende saber qual a distância do receptor, dado um determinado número de amostras de atraso.....	40
Figura 30 - Comparação entre a sequência binária emitida e a recebida.....	41
Figura 32 - Demonstração do conceito de cálculo das coordenadas através de algoritmos de trilateração.....	42
Figura 31 - Fotografias da experiência de cálculo das coordenadas de um receptor móvel através de algoritmos de trilateração.....	42
Figura 33 - Correlação do sinal emitido com os diversos sinais recebidos	45
Figura 34 - Esquema com a forma e dimensões da sala utilizada para os testes	45
Figura 35 - Cálculo das coordenadas do utilizador através de algoritmos de multilateração	46
Figura 36 - Estrutura interna do conceito de funcionamento de um acelerómetro	50
Figura 37 - Movimento de rotação sobre o eixo x (<i>roll</i>) detectado através de um acelerómetro tendo como referência a aceleração gravítica.....	51

Figura 38 - Movimento de rotação sobre o eixo y (<i>pitch</i>) detectado através de um acelerómetro tendo como referência a aceleração gravítica	51
Figura 39 - Demonstração do uso de acelerómetros num iPhone para orientação do ecrã (PK GMZ .:The Blog, 2011).....	52
Figura 40 - Comandos de consolas de videojogos que utilizam sensores de orientação (à esquerda Wiimote; à direita Playstation Move)	53
Figura 41 - Movimento de rotação dos ângulos <i>roll</i> , <i>pitch</i> e <i>yaw</i> que podem ser interpretados por giroscópios (APPLE, 2011).....	54
Figura 42 - Sistema de orientação IntertiaCube3 da Intersense.....	60
Figura 43 - Diagrama de blocos do Sistema de orientação IntertiaCube3.....	60
Figura 44 - Montagem utilizada para realizar comunicação por I2C com o LSM303DLH (STMICROELECTRONICS, 2010)	64
Figura 45 - Representação dos referenciais utilizados para calcular os ângulos.....	69
Figura 46 - Relação entre o ângulo fornecido pelo sensor de orientação e o ângulo da fonte relativamente ao utilizador.....	70
Figura 47 - Função inicialmente utilizada para gerar o sinal sonoro a partir da informação da orientação da cabeça relativamente à fonte sonora	70
Figura 48 - Em cima: Resposta a impulso para os canais esquerdo e direito com 10º de azimute e 10º de elevação. Em baixo : Resposta a impulso para os canais esquerdo e direito com 10º de azimute e 10º de elevação utilizando interpolação do tipo " <i>nearest</i> " para o dobro dos pontos .	74
Figura 49 - Em cima: Resposta a impulso para os canais esquerdo e direito com 10º de azimute e 10º de elevação. Em baixo : Resposta a impulso para os canais esquerdo e direito com 10º de azimute e 10º de elevação utilizando interpolação do tipo " <i>linear</i> " para o dobro dos pontos. ...	74
Figura 50 - Em cima: Resposta a impulso para os canais esquerdo e direito com 10º de azimute e 10º de elevação. Em baixo : Resposta a impulso para os canais esquerdo e direito com 10º de azimute e 10º de elevação utilizando interpolação do tipo " <i>spline</i> " para o dobro dos pontos. ...	75
Figura 51 - Resultados obtidos para 100 medidas em três posições diferentes. Verde - posição instantânea. Magenta - posição filtrada	78
Figura 52 - Diagrama de blocos para os programas AAR317 Orientation e AAR317 Position.....	80

Figura 53 - Diagrama de blocos para os programas AAR317 Navigation.....	82
Figura 54 - Resultados obtidos do teste do programa AAR317 Orientation.....	84
Figura 55 - Resultados obtidos do teste do programa AAR317 Position	85
Figura 56 - Erro médio da distância à fonte em função da altura.....	86
Figura 57 - Respostas obtidas às principais perguntas do questionário	88
Figura 58 - Fotografia de um utilizador durante a sessão de testes	89

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Exemplos de sistemas de localização comerciais	8
Tabela 2 - Exemplos de sistemas de orientação comerciais	10
Tabela 3 - Características dos Sistemas Operativos móveis actuais	17
Tabela 4 - Variáveis definidas para definição do sinal modulado	36
Tabela 5 - Exemplos de circuitos integrados de acelerómetros	52
Tabela 6 - Exemplos de circuitos integrados de giroscópios.....	55
Tabela 7 - Exemplos de circuitos integrados e sensores de magnetómetros	56
Tabela 8 - Exemplos de circuitos integrados de sistemas com vários sensores.	58
Tabela 9 - Resultados obtidos do teste do programa AAR317 Orientation.....	83
Tabela 10 - Resultados obtidos do teste do programa AAR317 Position	85

Lista de acrónimos

Acrónimo	Descrição
ADC	Analog-to-Digital Converter
ASK	Amplitude-Shift Keying
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
CIPIC	Center for Image Processing and Integrated Computing
DAC	Digital-to-Analog Converter
DeCA	Departamento de Comunicações e Arte
DETI	Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática
FET	Field-Effect Transistor
FSK	Frequency-Shift Keying
GPS	Global Positioning System
HMD	Head Mounted Displays
HRTF	Head-Related Transfer Function
IDE	Integrated Development Environment
IEETA	Instituto de Engenharia Electrónica e Telemática de Aveiro
IP	Internet Protocol
KEMAR	Knowles Electronics Manikin for Auditory Research

MATLAB	MATrix LABoratory
MEMS	Microelectromechanical systems
MIT	Massachusetts Institute of Technology
OPAMP	OPerational AMPlifier
PC	Personal Computer
PDA	Personal digital assistant
PSK	Phase-Shift Keying
QREN	Quadro de Referência Estratégico Nacional
RA	Realidade Aumentada
RAA	Realidade Aumentada Áudio
RF	Radio Frequency
RS-232	Recommended Standard 232
SDK	Software Development Kit
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TDM	Time-Division Multiplexing
UA	Universidade de Aveiro
UDP	User Datagram Protocol
USB	Universal Serial Bus
UWB	Ultra-WideBand
WLAN	Wireless Local Area Network

1. Introdução

1.1. Enquadramento do trabalho

Esta dissertação enquadra-se num projecto do QREN (Quadro de Referência Estratégico Nacional) denominado "Pervasive Tourism", uma parceria entre a Universidade de Aveiro (DETI/IEETA e DeCA) e a empresa UbiWhere. Tal como o nome indica, este projecto visa a introdução de novos conceitos no turismo – neste caso específico, ao nível das novas tecnologias.

Um dos objectivos deste projecto é desenvolver um sistema de Realidade Aumentada Áudio para aplicações em Turismo, nomeadamente visitas a museus. A ideia consiste em oferecer aos utilizadores, sem limitar a sua livre movimentação numa dada sala de um museu conteúdos pertinentes aos itens em exposição (quadros, esculturas, etc.) apresentados através de fontes sonoras virtuais associadas a cada um, nomeadamente em termos da sua aparente localização espacial.

Tome-se como exemplo um quadro que represente, por exemplo, uma praia. Uma forma de amplificar a experiência de apreciar esse quadro, seria associar-lhe uma fonte sonora virtual que emitisse sons semelhantes aos que se ouvem numa praia, tal como o som das ondas do mar. Este tipo de interacção já se encontra hoje em dia em alguns museus. A grande inovação que este projecto propõe desenvolver no sentido de aumentar a sensação de "imersão" no ambiente, é conseguir que a posição do utilizador na sala e a orientação da sua cabeça afectem de forma apropriada e realista o som que ouve. Seria como se o quadro se encontrasse efectivamente equipado com uma coluna de som, mas apenas o utilizador do sistema de Realidade Aumentada Áudio tivesse essa percepção. Este é um projecto bastante ambicioso, pois envolve a integração de diversos componentes a nível de *hardware* e *software*.

Este trabalho tem então como objectivo final a construção de um protótipo funcional, ainda que com algumas limitações relativamente ao que constituiria um sistema ideal, impostas pelo horizonte temporal de um ano lectivo e pela necessidade de averiguar soluções e justificar decisões de projecto.

1.2. Organização da tese

A tese encontra-se organizada em 8 capítulos. O primeiro e presente capítulo (Introdução) apresenta um enquadramento sucinto do projecto e dos resultados que pretende atingir.

O capítulo 2 introduz o tópico da Realidade Aumentada Áudio, explicando o conceito e fazendo uma avaliação do estado da arte.

O sistema definido como 'ideal' é discutido no capítulo 3, que descreve igualmente as especificações do protótipo construído e em que medida ele difere do sistema ideal. São descritos os diversos módulos constituintes e como se pretende que funcionem e se articulem.

Os capítulos 4, 5 e 6 abordam respectivamente o Sistema de Localização Espacial, o Sistema de Orientação Espacial e o Sistema de Auralização que foram desenvolvidos para este projecto, descrevendo todo o percurso a nível de pesquisa e testes até atingir o objectivo final.

O sétimo capítulo apresenta os resultados quantitativos e qualitativos que foram obtidos nos testes a que se submeteu o protótipo desenvolvido, incluindo testes subjectivos com voluntários.

Por fim, o capítulo 8 apresenta as conclusões tiradas durante o desenvolvimento do trabalho, bem como pontos a melhorar/desenvolver, tendo em vista trabalho futuro.

2. Realidade Aumentada Áudio

A Realidade Aumentada (RA) consiste numa variação da Realidade Virtual (AZUMA, 1997). A diferença fulcral entre ambas é que enquanto a última cria um novo ambiente, totalmente virtual, no qual o utilizador não tem qualquer tipo de interacção com o mundo real, a Realidade Aumentada insere o utilizador no mundo real e acrescenta-lhe objectos virtualmente. Em suma, a Realidade Aumentada complementa a realidade ao invés de a substituir.

O conceito de Realidade Aumentada é normalmente tomado como Realidade Aumentada Vídeo. Com efeito, este é o tipo de RA mais popular, existindo já em diversas aplicações, tais como aplicações para *smartphones*, (Figura 1), GPS, jogos de vídeo ou parques de diversões.



Figura 1 - Sistema de Realidade Aumentada Vídeo (W.t.t.Future, 2011)

A RA Áudio começa entretanto a ganhar maior atenção. O conceito é análogo: a introdução de um objecto virtual (no caso uma fonte sonora) no mundo real. Trata-se de transmitir ao utilizador a sensação de existência de uma fonte sonora, num determinado local, como se aí se encontrasse um objecto real a emitir som. Para tal, como na realidade aumentada vídeo, onde o sistema base consiste numa câmara para filmar o mundo real e uns óculos ou um ecrã para representar os resultados obtidos após a adição de objectos virtuais, relativamente ao áudio, o

sistema precisa de saber onde o utilizador se localiza num determinado espaço (sistema de detecção de localização), qual a sua orientação relativamente às fontes sonoras virtuais (sistema de detecção de orientação) e posteriormente emitir um som que induzirá no utilizador a sensação da existência da fonte sonora num determinado local (sistema de auralização). Essa emissão é feita através de auscultadores (*headphones* ou *earphones*), pois cada utilizador encontra-se num local e numa orientação únicos, pelo que o som gerado deve também ser exclusivo para cada utilizador.

A aplicabilidade deste conceito é muito grande mas provavelmente a principal utilização consistirá em museus, parques de diversões ou actividades de entretenimento semelhantes. Tal como já foi anteriormente referido, é precisamente neste tipo de actividades em que o projecto desenvolvido se foca.

2.1. Sistemas de Realidade Aumentada Áudio

A área da Realidade Aumentada Áudio (RAA) não é ainda muito explorada e consequentemente não existem muitos exemplos de sistemas que actualmente tirem partido desta tecnologia.

Actualmente um dos produtos mais populares na área da RAA é o Toozla (TOOZLA, 2011). Trata-se de um serviço disponível para a maior parte dos telemóveis mais recentes e que se encontra orientado para o turismo, nomeadamente em locais exteriores. O sistema obtém a localização do utilizador através de GPS e utilizando essa informação disponibiliza conteúdos áudio, seleccionáveis pelo utilizador, que podem ir desde guias áudio, informações locais ou até conteúdos colocados por outros utilizadores. Este sistema foi desenvolvido pela empresa russa Toozla LLC, abrange já muitas cidades pelo mundo inteiro e encontra-se disponível gratuitamente para diversos sistemas operativos móveis.

Por outro lado, a nível de investigação muitos protótipos foram já desenvolvidos na área da Realidade Aumentada Áudio, utilizando abordagens bastante diversas. Por exemplo, no ano 2000 o sistema "*Hear&There*" (ROZIER et al., 2000) foi desenvolvido no MIT Media Lab. Este sistema utilizava GPS e um magnetómetro de maneira a detectar a localização e orientação do utilizador. Através da associação de colecções de sons a determinados pontos de interesse, permitia que o utilizador, ao aproximar-se de uma dada área, ouvisse os sons que lhe tinham sido associados.



Figura 2 - Exemplo das funcionalidades do sistema Toozla (Augmented Planet, 2011)

Mais recente (2005), o sistema "*Riot! 1831*" (REID et al., 2005) utiliza uma tecnologia semelhante; os utilizadores estão equipados com um PDA iPAQ, um receptor GPS e auscultadores. Foi testado colocando os utilizadores a circular por uma área de aproximadamente 22000 m², ao longo da qual era simulado através de áudio um ambiente que recriava os distúrbios em Bristol no ano de 1831. Este sistema foi desenvolvido por investigadores da Universidade de Bristol e dos laboratórios da Hewlett-Packard da mesma cidade, tendo sido utilizado por cerca de 700 pessoas durante 3 semanas.

Pode-se ainda referir um estudo efectuado em 2010 entre a Universidade de Glasgow e a Universidade da Madeira (VAZQUEZ-ALVAREZ et al., 2011). Foi então desenvolvido um sistema de realidade aumentada áudio utilizando um telemóvel Nokia N95 8 GB, um receptor GPS, um sensor de orientação da cabeça (ambos ligados por *bluetooth* ao telemóvel) e auscultadores. O método de interacção com o utilizador era semelhante aos sistemas anteriormente referidos, utilizando pontos de interesse associados com áreas de activação.

2.2. Auralização

A auralização está na base do Sistema de Realidade Aumentada Áudio, dado que se pretende introduzir no sistema fontes sonoras virtuais cuja origem o utilizador seja capaz de diferenciar. Dado que o som que cada utilizador percepção é único, devido à sua particular posição espacial e orientação da cabeça, torna-se necessário gerar um sinal sonoro único para cada

utilizador do sistema. Por esta razão, a reprodução por altifalantes não é apropriada; é necessário recorrer a auscultadores.

Trata-se então, neste trabalho, de utilizar um sinal sonoro previamente definido (como um conteúdo interpretativo associado a um quadro) e transformá-lo num outro sinal com dois canais (estéreo) que permita ao utilizador identificar o local onde a fonte sonora foi virtualmente colocada.

O sinal deverá ser processado de forma a reproduzir as diversas transformações que um sinal sonoro na realidade sofre desde o momento em que é emitido de um determinado ponto até chegar aos ouvidos do utilizador. Podem-se apontar como factores influentes a considerar o meio de propagação, a forma do ouvido externo ou o diâmetro da cabeça. Em suma, é necessário utilizar uma função de transferência que transforme o sinal a reproduzir num outro que reflecta todas essas influências. Uma tal função de transferência, designada HRTF (*Head Related Transfer Function*) é habitualmente obtida através de uma série de medidas do sinal recebido nos ouvidos esquerdo e direito de um manequim apropriado. O modelo de manequim mais conhecido é o KEMAR (*Knowles Electronics Manikin for Auditory Research*) – vide Figura 3.



Figura 3 - Medição de HRTF's num manequim KEMAR(DAVIS)

Existem bases de dados de HRTF disponibilizadas gratuitamente, sendo as mais conhecidas do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) e do CIPIC (*Center for Image Processing and Integrated Computing*). Ambas são bastante utilizadas em trabalhos de investigação.

2.3. Localização/Orientação

2.3.1. Localização XYZ

Uma das partes mais importantes do Sistema de Realidade Aumentada Áudio consiste na definição da posição do utilizador dentro de um determinado espaço. Como tal, torna-se necessário proceder à escolha de um sistema de localização para espaços fechados. Actualmente existem muitos sistemas deste tipo, com diversas metodologias de funcionamento, cada uma delas apresentando as suas vantagens e desvantagens. As principais tecnologias utilizadas são essencialmente sinais de rádio (tais como sinais Wi-Fi ou WLAN), Ultra-sons e infravermelhos. (GREENEMEIER, 2008)

O posicionamento utilizando a tecnologia de sinais de rádio apresenta como principal vantagem o facto de utilizar tecnologia barata e disponível na maioria dos locais. Desta maneira, aparelhos que disponham da capacidade de comunicação através de uma rede *wireless* tal como computadores portáteis ou *smartphones* podem facilmente obter a sua localização espacial através da simples implementação de software no dispositivo. Por outro lado, os ultra-sons apresentam a vantagem de ter uma maior precisão relativamente aos sistemas de sinais de rádio. Com esta tecnologia é possível controlar melhor os sinais emitidos e recebidos de maneira a melhorar a precisão na localização, isto porque é possível definir as propriedades dos emissores e dos receptores (o seu ângulo de divergência, a sua sensibilidade, etc.).

Por fim, os sistemas de localização baseados em infravermelhos apresentam a vantagem de serem praticamente imunes a interferências uma vez que grande parte dos sistemas de comunicação sem fios operam uma zona do espectro de radiofrequência muito inferior ao da luz visível. A principal desvantagem destes sistemas reside no facto de necessitarem da colocação de muitos sensores pelas paredes do local a efectuar localização. (EKAHAU, 2005)



Empresa	Nome do produto	Tecnologia utilizada	Aplicações a que o fabricante aponta	Imagem
Sonitor	Sonitor® Real Time Locating System (RTLS)	Ultra-sons	Localização de equipamentos, pacientes e profissionais de saúde dentro de hospitais. Localização de pessoas em conferências, restaurantes e minas.	
Ekahau	Ekahau Real-Time Location System	Wi-Fi	Localização de equipamentos, pacientes e profissionais de saúde dentro de hospitais. Localização de pessoas e equipamentos dentro de empresas, indústrias, etc.	
Zebra Enterprise Solutions	Zebra Dart Ultra-Wideband (UWB) Real Time Locating System	UWB (Ultra-wideband)	Localização de pessoas e equipamentos dentro de empresas, indústrias, etc. Destina-se a localização interior e exterior.	

Tabela 1 - Exemplos de sistemas de localização comerciais

2.3.2. Orientação

O segundo ponto fulcral do sistema de realidade aumentada áudio consiste na orientação do utilizador. Tal como a localização espacial, a orientação do utilizador será também uma das variáveis a ter em conta no momento de cálculo do sinal sonoro a ser enviado para o utilizador. A Figura 4 ilustra melhor a ideia apresentada.

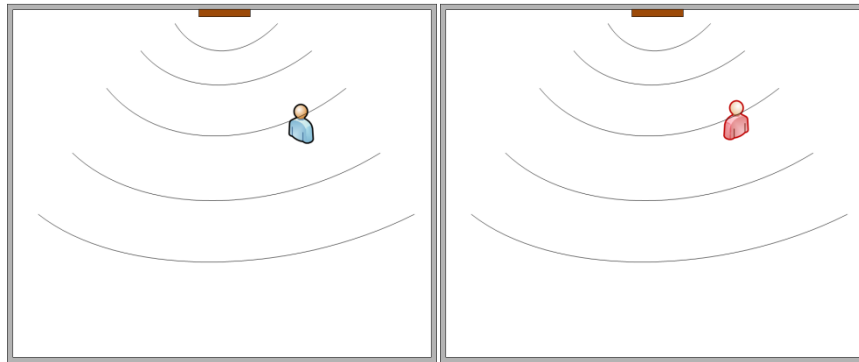


Figura 4 - Fonte sonora virtual emitindo um som - A percepção sonora dos dois utilizadores é diferente pois apesar de se encontrarem no mesmo local, têm uma orientação diferente relativamente à fonte sonora

Como é possível concluir através da análise da imagem anterior, torna-se imediatamente óbvio que a percepção sonora dos dois utilizadores será diferente, apesar de se encontrarem no mesmo local, uma vez que se encontram orientados de forma diferente relativamente à fonte emissora.




Empresa	Nome do produto	Graus de liberdade	Precisão	Aplicações a que o fabricante aponta	Imagem
InterSense	IntertiaCube BT	3 (Yaw, Pitch e Roll)	1º - Yaw 0.5º - Pitch 0.5º - Roll (25°C)	Ideal para análise do movimento humano com comunicação bluetooth. Compatível com Android.	
Polhemus	MINUTEMAN	3 (Yaw, Pitch e Roll)	Superior a 2º em todas as direcções.	Ideal para utilização em aplicações de realidade virtual com Head Mounted Displays (HMD), jogos, simulações e testes.	
VR-SPACE INC.	WinTracker III	6 (X, Y, Z, Yaw, Pitch e Roll)	0.15 cm RMS para o receptor X, Y e Z. 0.3 ° RMS para Yaw, Pitch e Roll.	Solução ideal para interacção com ambientes de realidade virtual, simuladores e outras aplicações 3D que necessitem de bastante precisão.	

Tabela 2 - Exemplos de sistemas de orientação comerciais

3. Sistema de Realidade Aumentada Áudio AAR317

Considerando o objectivo final do trabalho, a construção de um Sistema de Realidade Aumentada Áudio, a primeira fase do projecto passou pela definição do Sistema. Optou-se por inicialmente definir qual seria o conceito do trabalho final pretendido, ou seja, o sistema como se estivesse pronto para ser comercializado. No entanto, tendo em conta as limitações temporais em que este trabalho se inseria, tornou-se necessária a definição de um objectivo que seguisse os contornos traçados pelo objectivo final, mas que fosse realizável e apresentasse simultaneamente desenvolvimento útil para trabalho futuro.

Assim, são apresentadas de seguida as ideias desenvolvidas na fase de planeamento do sistema, quer para o ideal, quer para o protótipo que foi desenvolvido no projecto em questão. O protótipo recebeu o nome AAR317, sendo que AAR significa "*Audio Augmented Reality*" e o número 317 é uma referência ao número do laboratório onde o mesmo foi desenvolvido.

3.1. Sistema Ideal

O conceito geral do projecto desenvolvido passa por permitir que um utilizador dentro de uma sala possa ser capaz de distinguir uma ou várias fontes sonoras virtuais colocadas em locais pré-definidos inicialmente. A título exemplificativo, imagine-se este conceito a ser aplicado a uma sala de museu. Neste caso, o objectivo consistiria em ter uma fonte sonora virtual colocada, por exemplo, dentro de um quadro a emitir conteúdos relacionados com o mesmo, e que o utilizador ao deslocar-se pela sala ou ao mover a sua cabeça conseguisse distinguir o local de onde vinha o som, como se ele fosse real (Figura 5).

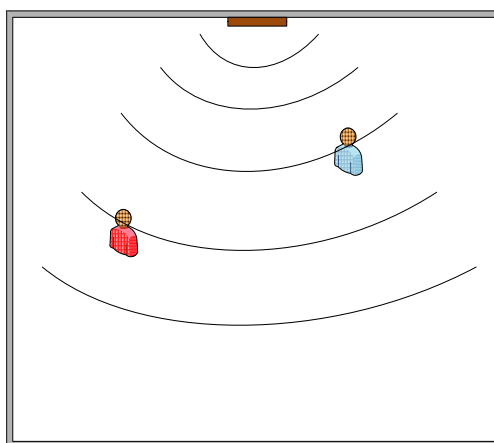


Figura 5 - Fonte sonora virtual emitindo um som: A percepção sonora dos dois utilizadores é diferente

Tendo em conta este conceito, torna-se necessário definir quais as implementações técnicas que terão de ser adoptadas de maneira a alcançar o objectivo desejado. Esse objectivo prende-se então com a necessidade de existir um dispositivo que ao receber informação sobre a localização do utilizador dentro da sala e a orientação da sua cabeça, consiga calcular qual o sinal sonoro que seria recebido por cada um dos seus ouvidos caso a fonte sonora fosse real. A função de transferência desta operação consiste na HRTF (*Head-Related Transfer Function*) (MARIETTE et al.). Posteriormente esse mesmo dispositivo teria de enviar esse sinal através de uns auscultadores que o utilizador estaria a usar, de maneira a provocar o efeito de realidade virtual.

Considerando esta implementação, verifica-se que será necessário desenvolver um sistema de localização espacial para espaços fechados, um sistema de orientação espacial para a orientação da cabeça e por fim a definição da maneira correcta de reproduzir os conteúdos desejados.

Tendo em conta o conceito de Sistema de Realidade Aumentada Áudio que foi adoptado, tornava-se então necessário definir os seguintes pontos, de maneira a ter o sistema a funcionar completamente:

- Funcionamento do Sistema de Localização Espacial;
- Funcionamento do Sistema de Orientação Espacial;
- Interface a utilizar entre o utilizador e o Sistema;
- Definição da localização do armazenamento de conteúdos.

A Figura 6 representa em detalhe toda a especificação do sistema ideal. Seguidamente os diferentes módulos vão ser abordados individualmente.

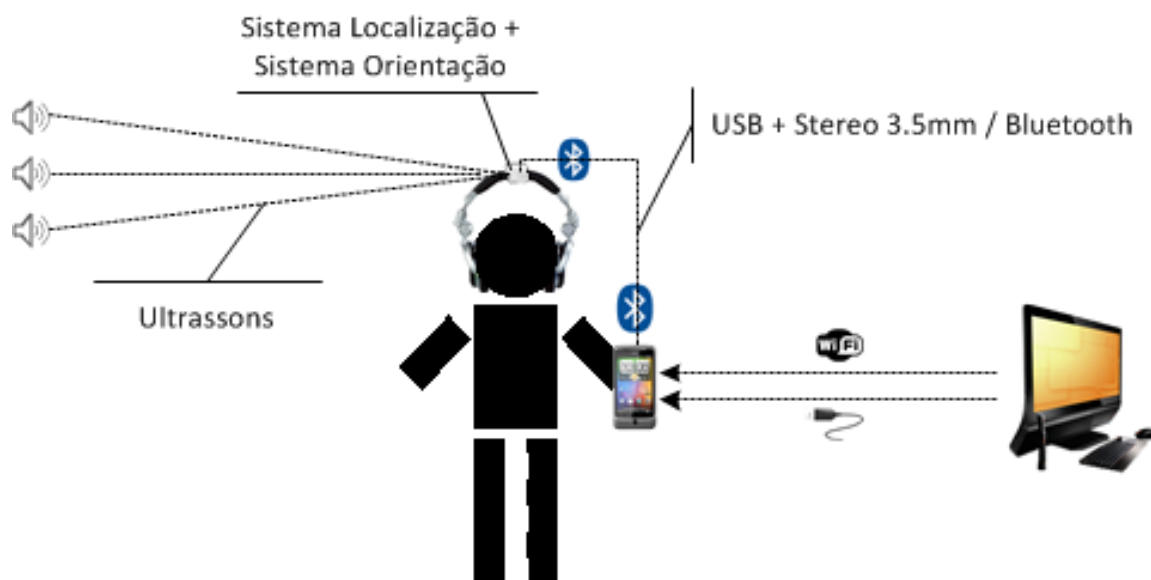


Figura 6 - Sistema de Realidade Aumentada Áudio Ideal

3.1.1. Sistema de Localização espacial

No caso específico deste trabalho, a solução adoptada passou pela implementação de um sistema de localização baseado em Ultra-sons. Foram diversos factores que levaram à escolha desta tecnologia. Em primeiro lugar, já tinham sido efectuadas no IEETA diversas investigações nesta área (LOPES, 2009, SÁ, 2008, SILVA, 2009), o que permitiria que houvesse muita informação disponível e como tal se tornasse mais rápida e eficiente a implementação deste sistema face a outro. Por outro lado, a tecnologia dos ultra-sons apresenta um custo de desenvolvimento relativamente baixo, o que permitiria que fossem feitas diversas experiências em diferentes condições. Porém o factor que mais peso teve na decisão foi o facto de os ultra-sons apresentarem uma precisão relativamente elevada que se adequava perfeitamente ao projecto em questão.

Desta maneira, a utilização de um sistema de localização por ultra-sons teria como base o cálculo do tempo de voo da onda emitida desde o emissor até ao receptor. Ou seja, utilizando

três ou mais emissores, é possível calcular a posição de um utilizador no plano X-Y através de algoritmos de multilateração.

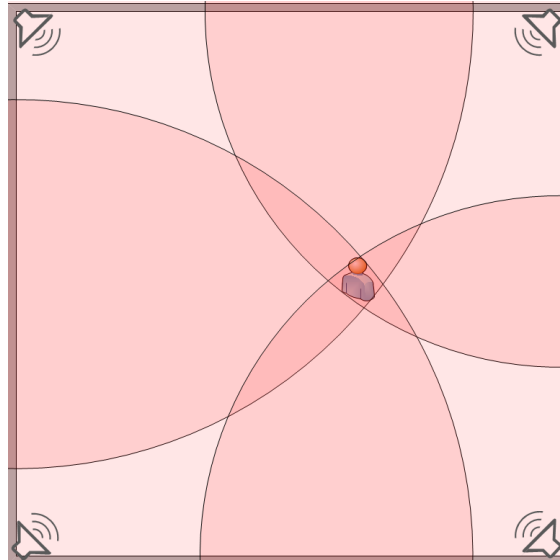


Figura 7 - Cálculo da posição do utilizador através de algoritmos de multilateração

A Figura 7 ilustra o conceito que se deseja implementar. Neste caso específico foram colocados quatro emissores ultra-sons nos cantos da sala. Considerando as condições atmosféricas da sala, a onda levará um determinado tempo a ser propagada. Este tempo em conjunto com a velocidade do som permitem calcular a distância a que o receptor se encontra do emissor. No entanto, apenas se obtém informação sobre a distância ao mesmo e não o local exacto onde se encontra. Para tal torna-se necessária a informação de mais sensores de maneira a que no fim se obtenha uma área na qual é mais provável encontrar-se o utilizador. Como é fácil de entender a precisão será tanto maior quanto o número de emissores utilizado.

O sistema ideal tem ainda em conta que os emissores ficarão ligados por cabos a um sistema que controle a sua emissão. Por outro lado, o receptor terá que apresentar a maior mobilidade possível, ou seja, não se pode encontrar ligado fisicamente aos emissores. Uma vez que se pretende medir os tempos de voo dos sinais, torna-se imperativo que o receptor tenha a informação do instante em que o sinal recebido foi efectivamente emitido. No entanto, como tal não acontece, este não se encontra sincronizado com os mesmos e de maneira a alcançar tal objectivo torna-se necessária a introdução de uma outra tecnologia que permita o sincronismo entre os emissores e o receptor.

A ideia adoptada durante a concepção do sistema ideal consistiu no envio de sinais RF. Como a transmissão deste tipo de sinais se pode considerar como instantânea comparativamente com os sinais ultra-sons (a velocidade da luz é muito superior à velocidade do som) então seria possível através da conjugação de ambas as tecnologias ter um sistema que se encontrasse sincronizado e como tal capaz de medir as distâncias entre o receptor e cada emissor.

3.1.2. Sistema de Orientação espacial

O objectivo deste módulo consistiria em ter um sistema que apresentasse à sua saída a informação da rotação relativa aos eixos X,Y e Z, ou seja, respectivamente os ângulos *Roll*, *Pitch* e *Yaw* como se pode verificar na Figura 8.

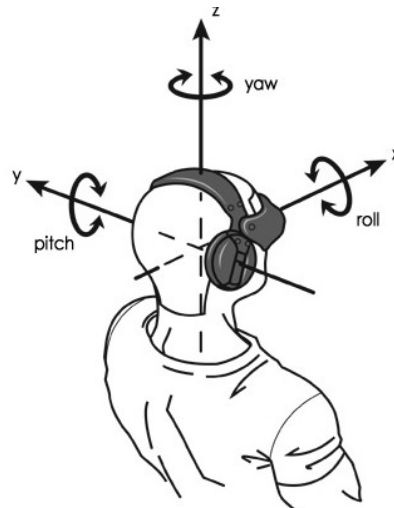


Figura 8 - Ângulos usados para definição da orientação da cabeça ([How Stuff Works](#), 2011)

A obtenção deste tipo de dados é realizada habitualmente através de sensores como acelerómetros, giroscópios, magnetómetros em circuitos integrados. Existem ainda circuitos que combinam vários tipos de sensores apenas num encapsulamento. Hoje em dia estes sensores tornaram-se muito populares em grande parte devido ao seu uso em *smartphones*, *tablets* e muitos outros dispositivos.

De maneira a que o dispositivo medisse o movimento da cabeça do utilizador seria necessário que este estivesse colocado na cabeça do mesmo. Uma vez que o sistema AAR317 tem em conta

que o utilizador utilizaria uns *headphones* para sentir o efeito da realidade aumentada áudio, a solução com mais sentido passaria por juntar os dois dispositivos, como representa a Figura 9.

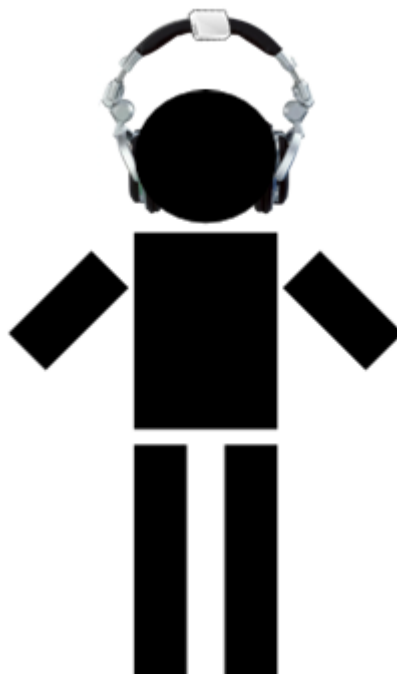


Figura 9 - Esquema a adoptar para integração do Sistema de Realidade Aumentada Áudio

O sistema de orientação seria então um sistema que enviasse com uma determinada frequência a informação da sua orientação para o local onde os dados seriam processados. Tendo em conta o sistema ideal, pretende-se que o hardware e software do sistema de orientação sejam todos desenvolvidos de raiz, de maneira a usufruir melhor das capacidades do mesmo, mas também para tornar a solução mais viável em termos financeiros.

3.1.3. Interface entre o utilizador e o sistema

A interação entre o utilizador e o sistema é bastante importante, principalmente se for considerado o caso da aplicação deste sistema a um museu. Seria então bastante atractivo e fácil de utilizar se o utilizador tivesse um dispositivo móvel na sua mão onde pudesse interagir com ele e controlar o sistema. O dispositivo móvel ideal seria então capaz de:

- Receber a informação do posicionamento espacial e da orientação da cabeça do utilizador e realizar o processamento necessário para a construção do sinal de áudio a emitir;

- Ter interfaces que permitam a conectividade entre o sistema de posicionamento, o sistema de orientação e os *headphones*.

Tendo em conta as características anteriormente mencionadas conclui-se que o dispositivo ideal a utilizar seria um PDA/*Smartphone*, porque este apresenta todas as características anteriormente mencionadas e para além disso trata-se de um dispositivo que o utilizador se encontra habituado a utilizar.

Hoje em dia existem diversos Sistemas Operativos móveis, cada qual apresentando diversas vantagens e desvantagens. Algumas dessas características podem ser encontradas na Tabela 3.

Sistema Operativo	Empresa responsável	Versão actual	Linguagem de programação	Licença
iOS	Apple	4.3	C, C++, Objective-C	Proprietário
Android	Open Handset Alliance(Google)	2.3.3	C, C++, Java	Livre
Windows Phone	Microsoft	7.0.7390.0	Principalmente .NET (Silverlight/XNA)	Proprietário
Symbian	Symbian Foundation	9.5	C++	Licença Pública Eclipse
Bada	Samsung	1.2	C++	Proprietário

Tabela 3 - Características dos Sistemas Operativos móveis actuais

Após uma análise aos principais Sistemas Operativos móveis, conclui-se que o Android é aquele que apresenta mais vantagens em relação aos seus concorrentes, por diversas razões. Em primeiro lugar, o seu código é livre, o que permite uma eventual configuração a um nível mais avançado, caso tal seja necessário. Para além disso, o Android está presente em diversos equipamentos de variadas marcas, cada qual com determinadas características, o que permitiria escolher o equipamento tendo em conta as necessidades do mesmo face ao contexto em que

seria utilizado. Por fim, mas não menos importante, o Android dispõe de uma enorme comunidade de programadores na Internet, o que permite que qualquer problema que possa existir seja facilmente ultrapassado face à quantidade de informação disponível.

Pelo facto de alguns destes equipamentos possuírem já no seu interior dispositivos como acelerómetros e giroscópios, torna-se ainda uma possibilidade o facto de substituir o sistema de orientação pelo próprio PDA/*Smartphone*, o que traria a vantagem de tornar o sistema mais simples de implementar, pois abdica-se de *hardware* externo, mas por outro lado implica que o equipamento tenha de ficar acoplado aos *headphones* do utilizador, de maneira a calcular a orientação da cabeça. Desta forma, esta implementação levaria a que se perdesse uma eventual interacção adicional entre o utilizador e o equipamento.

3.1.4. Armazenamento de conteúdos

Tendo em conta que se pretende efectuar a reprodução de conteúdos áudio, esses mesmos conteúdos necessitam de estar armazenados em algum local. Desta maneira, considerando o que foi dito no ponto anterior, que se pretendiam utilizar *smartphones* para interacção com o utilizador, os ficheiros áudio poderiam estar armazenados no próprio equipamento, na sua memória interna, ou num cartão de memória.

Considerou-se também a hipótese em que os conteúdos áudio teriam de ser alterados ou actualizados. Desta maneira, o *smartphone* poderia conectar-se através de USB ou *Wireless* a um servidor, onde efectuaría o *download* dos novos conteúdos.

3.2. Sistema Protótipo

Uma vez que a solução anteriormente descrita consiste num projecto bastante ambicioso e com uma complexidade muito elevada, tornou-se necessário, no âmbito do tempo disponível para a realização deste projecto definir quais os objectivos finais que fossem possíveis de alcançar. Para além disso, na fase inicial deste projecto, o objectivo principal seria estudar a viabilidade de todas as soluções definidas para o sistema ideal, de maneira a que, caso fosse necessário, se pudesse efectuar uma reformulação do mesmo. Assim, o sistema deveria permitir estudar separadamente e com facilidade todos os módulos implementados.

Definiu-se então que o protótipo devia ser capaz de realizar a localização e orientação da cabeça dentro da sala, bem como gerar os sons a reproduzir através do uso de HRTF. Optou-se também por abdicar das comunicações sem fios, dado que se trata de um problema mais técnico.

Tal como no ponto anterior serão então analisados de novo os principais módulos constituintes do projecto final, sendo desta vez apresentado o trabalho a ser executado neste projecto. A Figura 10 representa o esquema da abordagem que foi adoptada para o protótipo.

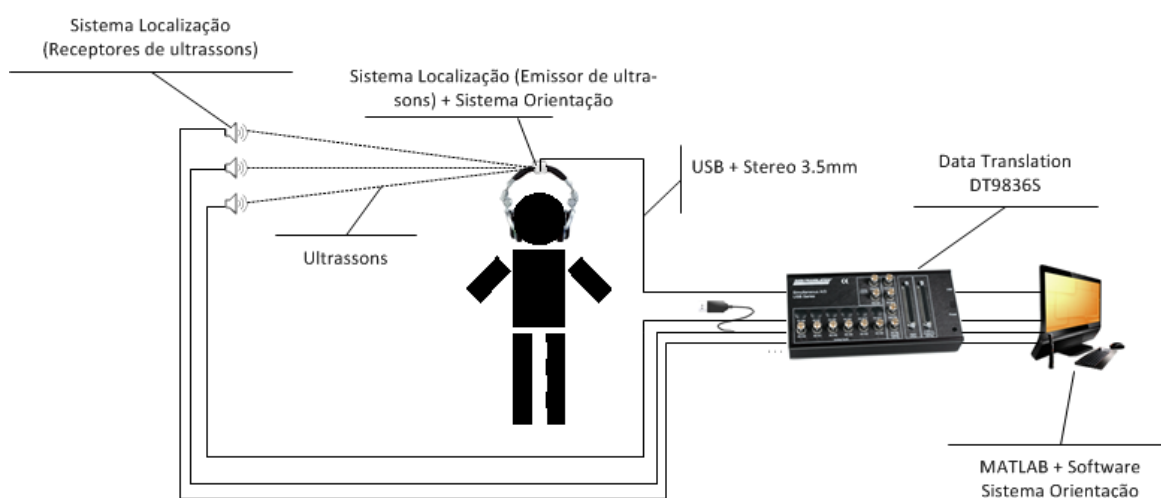


Figura 10 - Protótipo do Sistema de Realidade Aumentada Áudio

3.2.1. Sistema de Localização Espacial

A ideia inicial para o sistema de localização consistiu em utilizar vários emissores de ultrassons colocados nas paredes e apenas um único receptor móvel, contrariamente à decisão final. Decidiu-se também que o sistema escolhido para protótipo terá o receptor móvel ligado por um fio ao sistema de aquisição de dados. Desta maneira, anula-se o grande problema do sincronismo entre os emissores e o receptor, necessários para o cálculo do tempo de voo dos sinais emitidos, sendo este um problema não fulcral considerando o objectivo final deste projecto. O sistema de localização espacial do protótipo utilizando modulação PSK pode então ser representado pelo esquema da Figura 11.

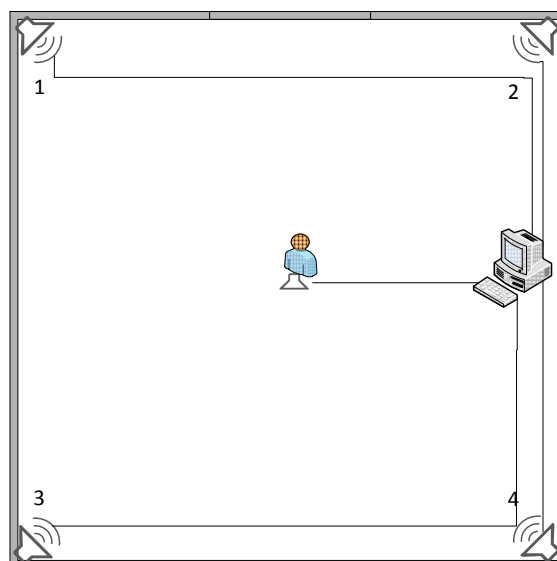


Figura 11 - Esquema do protótipo do Sistema de Localização Espacial

O sistema de localização espacial utilizado na versão de demonstração acabou por diferir do inicial. A primeira abordagem utilizou a modulação PSK para transmissão dos sinais, enquanto que a segunda utiliza um sinal do tipo "*chirp*", com um varrimento de frequências entre os 10KHz e os 50KHz. A razão desta mudança encontra-se especificada nos próximos pontos.

Chegou-se à conclusão que o software ideal para desenvolvimento deste projecto é o MATLAB, dada a sua facilidade em processamento e manipulação de sinais. Como tal, o ideal seria utilizar um equipamento onde através de comunicação com o PC, correndo um código gerado em MATLAB, emitisse o sinais dos emissores e adquirisse o sinal do receptor. Esse equipamento é a placa de aquisição Data Translation DT9836S (Figura 12). Esta comunica com o PC através de USB e apresenta como principais características o facto de ter 6 entradas analógicas, 2 saídas analógicas, 16 entradas digitais e 16 saídas digitais. Esta placa é capaz de efectuar aquisição do sinal analógico a uma taxa de 800KS/s.



Figura 12 - Data Translation DT9836S

3.2.1.1. Utilização de modulação PSK

O tipo de modulação utilizada inicialmente pelos emissores de ultra-sons consistirá na modulação PSK. Estes emitirão os seus sinais com uma determinada ordem, ou seja, utilizando multiplexagem temporal. Desta maneira, torna-se possível evitar o aumento de complexidade provocado pela necessidade de envio de uma mensagem de identificação de cada emissor, bem como a utilização de diferentes frequências de portadora. A utilização da técnica de multiplexagem temporal facilita bastante a decodificação do sinal, dado que se consegue identificar qual o sinal relativo a cada emissor devido à utilização de janelas de tempo, como se pode observar na Figura 13.

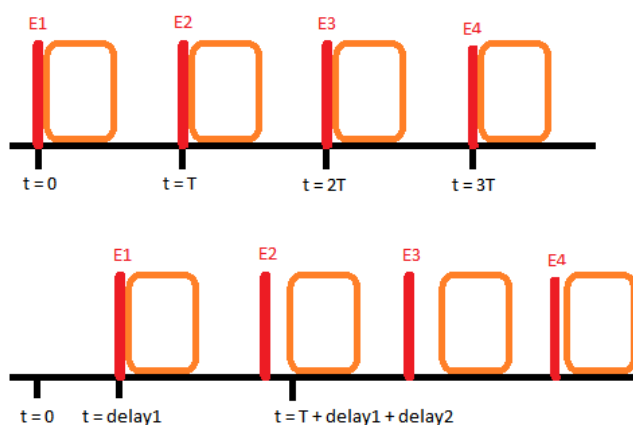


Figura 13 - Cálculo do tempo de voo do sinal utilizado multiplexagem temporal

Na imagem estão representados os sinais combinados de todos os emissores (em cima) e o sinal recebido no receptor (em baixo). No sinal do emissor é possível constatar que existe uma janela

temporal com duração de T segundos associada a cada emissor. Por exemplo, entre 0 e T segundos a janela encontra-se "reservada" para o emissor 1 (E1) e como tal o sinal do emissor 1 (representado a laranja) é transmitido assim que a sua janela se inicia. A duração deste sinal tem de ser obrigatoriamente inferior à da janela que lhe está atribuída. Para além disso, o tempo T encontra-se relacionado com o tamanho mínimo que a sala tem que ter e vice-versa. Ou seja, supondo que a sala apresenta uma dimensão d, o tempo máximo que a transmissão de todos os sinais pode demorar é dado por $T_{Total_{max}} = \frac{d}{v}$, onde v representa a velocidade do som. O mesmo raciocínio pode ser utilizado para os seguintes emissores. O receptor inicia a sua aquisição de sinal ao mesmo tempo que o primeiro emissor começa a emissão. No entanto, devido ao atraso provocado pela propagação, a recepção não será imediata e como tal o sinal recebido, por exemplo do emissor 1 não se irá encontrar no instante $t=0$, mas sim no instante $t = \text{delay1}$. Este atraso temporal permite-nos calcular então a distância entre o emissor 1 e o receptor e funcionará como ponto de referência para os sinais seguintes.

O cálculo da distância para os restantes emissores é análogo. Considerando por exemplo o emissor 2, sabe-se que caso a transmissão fosse imediata o sinal recebido encontrar-se-ia em $t = T$. No entanto, tendo em conta o atraso do primeiro emissor, que é usado como referência e o atraso do segundo emissor, o sinal encontrar-se-á em $t = T + \text{delay1} + \text{delay2}$.

3.2.1.2. Utilização de um sinal do tipo "chirp"

Um sinal do tipo "chirp" trata-se de um sinal que num determinado tempo percorre uma gama de frequências pré-definida. Como neste caso a tecnologia utilizada são os ultra-sons, a gama de frequências terá de ter como limite inferior aproximadamente 20KHz.

A necessidade da utilização deste tipo de sinal surgiu devido ao facto de no momento de implementação da demonstração do sistema não existirem amplificadores adequados às colunas emissoras de ultra-sons. Desta maneira, relação sinal ruído era muito baixa quando se utilizava a emissão de um sinal com codificação PSK, pelo que se tornava impossível a descodificação do tempo de voo da onda ultrassónica. Assim, surgiu a necessidade de se optar por transmitir o sinal de maneira diferente. Essa alternativa passou pela utilização de um sistema baseado no trabalho de doutoramento realizado por Sérgio Lopes no IEETA. O conceito baseia-se no envio de um sinal do tipo "chirp" pelo emissor. A relação sinal ruído será, tal como no caso anterior, muito baixa, pelo que a diferença consiste na forma como o sinal é descodificado. A descodificação do sinal utiliza a correlação cruzada com o sinal inverso do

enviado. Do resultado da correlação cruzada torna-se possível extrair o seu ponto máximo que indica o local onde no sinal recebido, a trama enviada se encontra. Desta maneira é então possível calcular o tempo de voo do sinal e consequentemente a distância.

Outra mudança que se verificou consistiu na definição de quais os emissores e quais os receptores no sistema. Na solução adoptada anteriormente, utilizava-se TDM para obter os tempos de voo de cada emissor colocado na parede. Este processo necessitava de uma janela temporal dedicada a cada emissor de maneira a se poder obter no final as coordenadas do utilizador. Com a utilização do sinal "*chirp*", a relação sinal ruído deixou de ser tão fulcral e como tal, não existia a necessidade de os emissores se encontrarem na parede. Ao invés, pode-se optar por utilizar um único emissor de ultra-sons, localizado na cabeça no utilizador, enquanto que os restantes dispositivos que se encontravam colocados na parede podem funcionar como receptores. Assim, obtêm-se quatro sinais distintos, dos quais se pode tirar a informação de cada distância e consequentemente as coordenadas na sala.

3.2.2. Sistema de Orientação Espacial

O Sistema de Orientação Espacial do protótipo apresentava como principal objectivo a monitorização da orientação da cabeça. De maneira a atingir este objectivo seria necessária a utilização de um dispositivo que conseguisse obter essa informação. Surgiram então duas hipóteses de desenvolvimento nesta área.

A primeira utilizaria sistemas de orientação comerciais. Desta maneira ter-se-ia um sistema onde toda a parte relativa ao desenvolvimento, montagem e teste de *hardware* estaria resolvida e o único problema residiria na aquisição desses dados para integração no programa final. A escolha deste sistema passaria pela pesquisa e compra de um modelo que satisfizesse os requisitos, ou pela utilização de um outro que já tivesse sido utilizado em investigações anteriores dentro do grupo de investigação.

A segunda opção apresenta uma abordagem mais complexa. O objectivo passaria pela utilização de um circuito integrado que disponibilizasse os dados necessários para posteriormente serem calculados os ângulos desejados. Esse circuito integrado seria ligado a um microcontrolador e como tal teria de ser desenvolvida também uma interface entre este e o PC para transmissão dos resultados adquiridos. Tendo em conta esta particularidade, escolheu-se à partida um microcontrolador que pudesse satisfazer as necessidades. Optou-se à partida pelo *kit* de desenvolvimento da Texas Instruments, o eZ430-RF2500 (Figura 14). Este *kit* apresenta uma

placa que permite a interface para efeitos de *debugging* ou de comunicação com o PC através de USB. Assim é possível programar facilmente o microcontrolador MSP430F2274, incluído no *kit*. Encontra-se ainda presente o circuito integrado CC2500, que corresponde a um *transceiver* multi-canal de RF. Os principais pinos do MSP430 encontram-se disponíveis para serem facilmente utilizados.

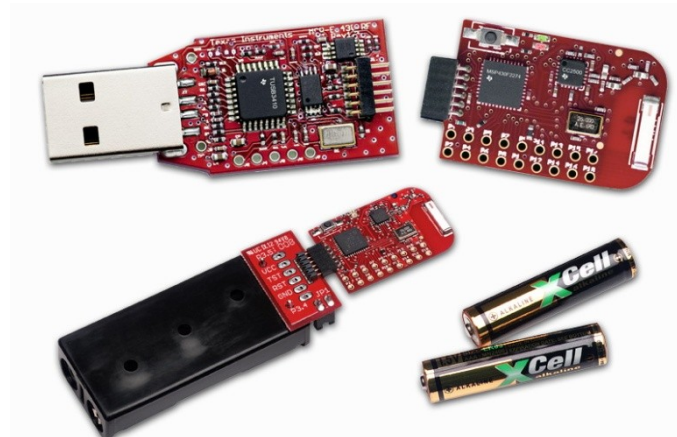


Figura 14 - Kit eZ430-RF2500 da Texas Instruments

No entanto, após alguns testes com o MSP verificou-se que o modelo que tinha sido adoptado apresentava problemas ao nível da comunicação I²C, interface usada pelo circuito integrado escolhido para realizar a aquisição da orientação da cabeça (Secção 5.3). Como a resolução desse problema seria bastante difícil e a aquisição de outro microcontrolador implicava uma nova fase de adaptação ao mesmo, optou-se por utilizar a primeira abordagem, ou seja, a utilização de um sistema comercial, que estabelece contacto directamente com o computador onde o programa principal se encontra a ser executado.

3.2.3. Interface entre o utilizador e o Sistema

Uma vez que a interface com o utilizador não é um problema com muita relevância, dado que o que se encontra mais em causa consiste na questão relacionada com a apresentação dos resultados, este ponto não foi tido muito em conta, sendo que os resultados pretendidos são representados no monitor do computador encarregue de correr o programa que controla o sistema.

3.2.4. Armazenamento de conteúdos

Tal como no ponto anterior não foi dada muita ênfase ao desenvolvimento deste tópico, uma vez que para o protótipo apenas se pretende a simulação de uma fonte sonora e como tal os conteúdos sonoros a reproduzir encontram-se armazenados localmente, no computador responsável pela execução do programa.

4. Localização Espacial

Como já foi referido, este projecto apresentava como principal objectivo a utilização de ultra-sons para realização da localização espacial. Os ultra-sons são sons que estão localizados numa gama de frequências acima daquelas que o ouvido humano consegue detectar. Apesar de este limite variar de pessoa para pessoa, apresenta um valor habitual de 20KHz para jovens adultos saudáveis. A razão pela qual é impossível que o Homem consiga ouvir ultra-sons está relacionada com limitações no Ouvido Médio (HEADINGS, 2011) que fazem com que este actue como um filtro passa-baixo, impossibilitando a audição de frequências tão altas.

A ideia da utilização de ultra-sons para utilização num sistema de localização espacial consistiria então em medir o tempo de voo da onda, ou seja, quanto tempo demoraria a chegar desde o emissor até ao receptor. A expressão utilizada para obtenção desta distância seria então dada por:

Equação 1

$$d = T_{voo} \times v$$

onde d é a distância a calcular, T_{voo} o tempo que a onda demora desde o emissor até ao receptor e v a velocidade de propagação do som no ar. Esta última é uma variável que depende de vários factores, nomeadamente as propriedades do meio onde se encontra. A propriedade mais influente trata-se na temperatura do ar, sendo a sua raiz quadrada directamente proporcional à velocidade de propagação do som, como a Equação 2 indica.

Equação 2

$$v = 331.3 \sqrt{1 + \frac{\vartheta}{273.15}}$$

Onde ϑ corresponde à temperatura do ar em graus Célsius.

A utilização de ultra-sons neste tipo de abordagem apresenta diversas vantagens no projecto em questão. A principal vantagem é facto de os ultra-sons não atravessarem paredes, o que se torna num ponto bastante forte caso se queira fazer localização apenas dentro de uma sala, não interferindo com salas adjacentes. Se, por exemplo, fossem usadas tecnologias de localização utilizando RF, o mesmo sistema de localização ao ser usado numa sala que se encontrasse

próxima da sala em questão poderia sofrer interferências. Para além desta vantagem, os transdutores ultra-sónicos consistem numa tecnologia relativamente barata. Porém, a utilização de ultra-sons também apresenta algumas desvantagens. A principal desvantagem encontra-se relacionada com a vantagem primeiramente referenciada, ou seja, apesar de a localização com ultra-sons possibilitar a não interferência entre sistemas de localização em salas adjacentes, caso um objecto seja colocado em frente de um transdutor ultra-sons, este fica impossibilitado de comunicar com os outros transdutores, pois não existe possibilidade de propagação ou recepção da onda sonora.

4.1. Testes iniciais

Inicialmente optou-se por realizar algumas simulações e testes para adaptação e estudo da viabilidade do projecto. Desta maneira, começou-se por realizar alguns testes de emissão e recepção de sinais ultra-sónicos utilizando a placa Data Translation e os transdutores MA40S5 da Murata. De seguida, abordar-se-ão os diversos módulos desenvolvidos nesta fase inicial.

4.1.1. Transdutores Ultra-sons

Os testes iniciais foram realizados com os MA40S5 da Murata. A razão pela qual se escolheram estes transdutores prende-se com o simples facto de já terem sido previamente utilizados numa Tese de Mestrado do 5º Ano no DETI (SILVA, 2009) e para efeitos de teste se encontrarem perfeitamente adequados. Estes transdutores apresentam como principais características:

- Directividade 70º;
- Largura de Banda de 2 KHz;
- Amplitude máxima do sinal enviado à frequência de 40KHz.



Figura 15 - Transdutor ultra-sons Murata MA40S5

Para além destes transdutores de ultra-sons, realizaram-se ainda testes com uma coluna de som e um microfone. A coluna de som utilizada consistiu na Kemo L10 (Figura 16), uma coluna piezo-eléctrica com uma largura de banda muito grande, que é utilizada habitualmente em equipamentos repelentes de animais. Esta coluna apresenta as seguintes características:

- Gama de frequência: 2 - 60 KHz
- Tensão máxima de saída: 30 Vpp
- Diâmetro: 41mm
- Altura: 12mm

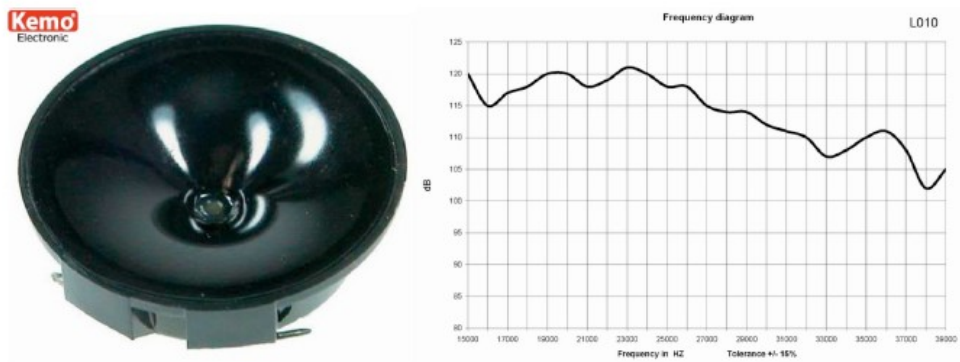


Figura 16 - Coluna piezo-eléctrica Kemo L10 e respectiva resposta em frequência

Por fim, o microfone utilizado foi o Panasonic WM-61A. Este microfone foi escolhido pois é barato e apresenta uma resposta linear na gama de frequências entre os 20Hz e os 60KHz.

O microfone encontra-se representado na Figura 17 e apresenta como características:

- Gama de frequências: 20-20000Hz;
- Directividade: Omnidireccional;
- Diâmetro: 6mm
- Altura: 3.4m



Figura 17 - Microfone Panasonic WM-61A

Visto que os sinais recebidos pelos transdutores que funcionam como receptores, e pelo microfone apresentam uma amplitude muito pequena, existia a necessidade de amplificar esse sinal antes de proceder à sua leitura. Desta maneira, utilizou-se o circuito de amplificação apresentado na Figura 18.

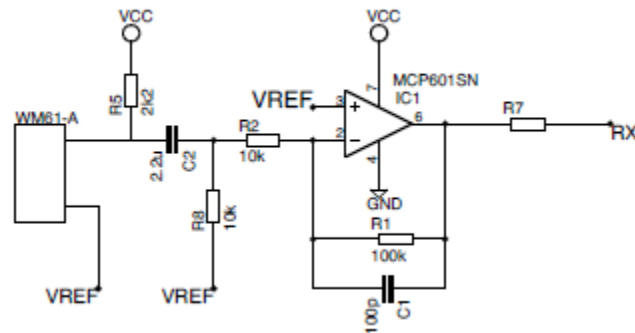


Figura 18 - Circuito de amplificação do sinal recebido pelo microfone

É possível verificar que o circuito se trata de configuração inversora utilizando um OPAMP *single-supply* e *rail-to-rail*, o MCP601. O ganho deste circuito é de 10 e o filtro passa-banda encontra-se ajustado entre as frequências 7.2Hz e 159KHz. A resistência R5 foi colocada de maneira a polarizar o FET interno do microfone.

Visto que o objectivo desta parte do trabalho era semelhante ao do projecto ALOC317 (LOPES et al., 2011), que se encontrava a ser desenvolvido no mesmo local de trabalho, optou-se por utilizar as placas criadas para esse trabalho, que se encontram representadas na Figura 19.

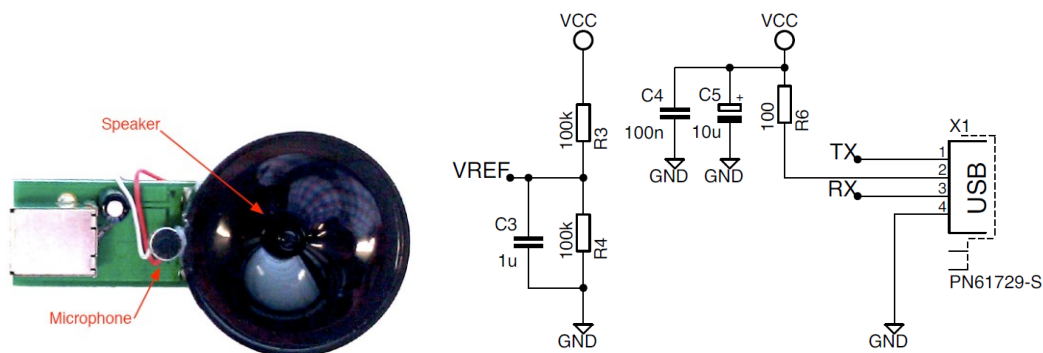


Figura 19 - Placa utilizada com microfone e coluna (esquerda). Esquema do circuito da placa(direita)

4.1.2. Hardware utilizado

Tal como já tinha sido referido para o envio e aquisição dos sinais dos transdutores de ultra-sons recorreu-se à placa Data Translation DT9836S, que permite interagir directamente com o MATLAB. A esta placa foi ligada uma outra placa que tinha sido previamente criada no DETI (LOPES et al., 2011), com o intuito de expandir as possibilidades de experiências a realizar com a placa original e colmatar algumas lacunas da mesma (Figura 20).

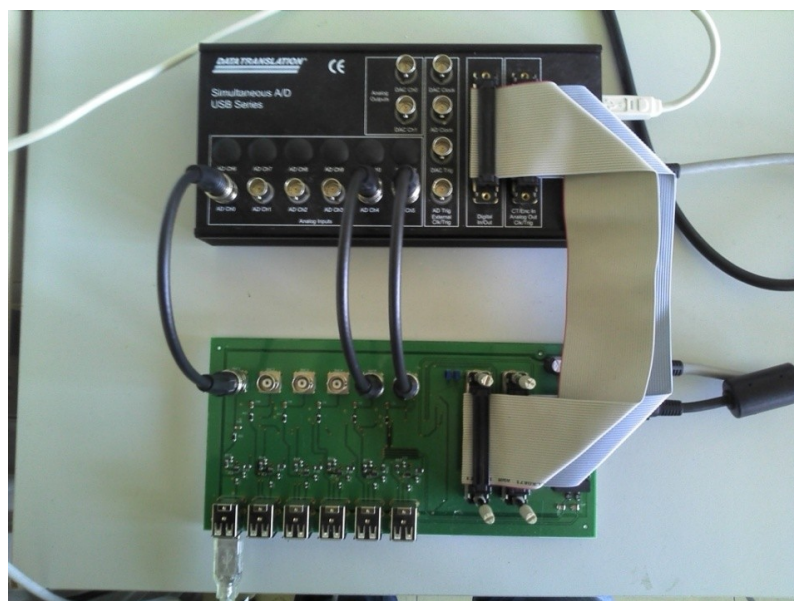


Figura 20 - Placa Data Translation DT9836S e a respectiva placa de melhoria.

As principais possibilidades desta placa consistem em:

- Expandir o número de DAC's da Data Translation, através da multiplexagem dos canais;
- Definir o ganho das ADC's através da utilização de amplificadores de ganho programável digitalmente.

Quer a multiplexagem dos canais, quer o ganho dos amplificadores podem ser modificados através por software no *script* MATLAB, através da programação dos valores das linhas digitais da Data Translation.

4.1.3. Modulação do sinal

Após a definição do *hardware* a utilizar, apontou-se como objectivo principal a realização de um programa que enviasse uma determinada mensagem digital binária modulada através do emissor, de maneira a que o receptor a pudesse decodificar. Esta mensagem é necessária para identificar quem foi o emissor do sinal, caso se utilizassem vários emissores e apenas um receptor. Se fosse utilizada a técnica de multiplexagem temporal, não se tornava necessária a identificação do emissor, dado que se atribui a cada emissor uma janela temporal e o receptor nesse espaço de tempo apenas receberá informação proveniente de um sensor. Porém, caso se deseje emitir todos os sinais simultaneamente, cada sinal tem de enviar uma mensagem que o identifique. Para além da identificação do sinal torna-se necessário, tal como na técnica de multiplexagem temporal, efectuar a medição do tempo de voo do mesmo, de maneira a conseguir-se calcular a distância pretendida.

Para o envio desta mensagem tornava-se necessário modular o sinal enviado. Existem diversas possibilidades de efectuar a modulação do sinal, destacando-se as técnicas de PSK (*Phase Shift Keying*), ASK (*Amplitude Shift Keying*) e FSK (*Frequency Shift Keying*) (Figura 21).

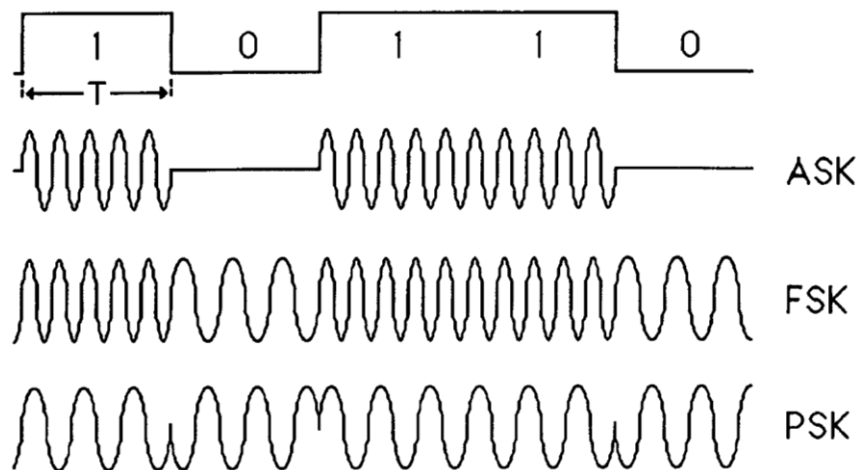


Figura 21 - Representação dos diferentes tipos de modulação (ASK, FSK e PSK) (Arcada University of Applied Life)

O PSK é um tipo de modulação onde a fase da frequência portadora do sinal varia conforme o símbolo que pretende representar. Considerando o exemplo mais simples de PSK que utiliza apenas dois símbolos, o BPSK, a diferença de fase entre eles é de π radianos.

A maneira como o ASK efectua a modulação de um símbolo relaciona-se com a variação da sua amplitude. Considerando que se pretende transmitir um sinal binário, o sinal ASK modulado apresentará amplitude nula para representação do valor '0', enquanto que para representação do valor '1' o sinal corresponderá ao sinal à frequência da portadora.

Por fim, a modulação FSK consiste num tipo de modulação onde se varia a frequência da portadora do sinal de maneira a representar símbolos diferentes.

A escolha acabou por recair na modulação PSK por diversas razões. Em primeiro lugar, excluiu-se automaticamente a utilização da modulação FSK pois esta necessitava necessariamente da utilização de duas frequências portadoras. Visto que o transdutor a utilizar apresenta uma amplitude máxima de sinal enviado à frequência de 40 KHz, se uma das frequências utilizasse este valor, a outra teria de estar situada num outro valor onde a amplitude seria menor, o que poderia levar que existissem dificuldades na desmodulação do sinal. Se por outro lado, nenhuma das frequências apresentasse o valor de 40KHz, estava-se a desperdiçar a frequência de amplitude máxima do transdutor. Para além disto, a probabilidade de erro da modulação FSK é a maior das três apresentadas. Esta foi também a razão pela qual se preferiu a modulação PSK à ASK, uma vez que a PSK se trata daquela que apresenta um *Bit Error Rate* (BER) menor para o mesmo valor de SNR, como se pode observar na Figura 22.

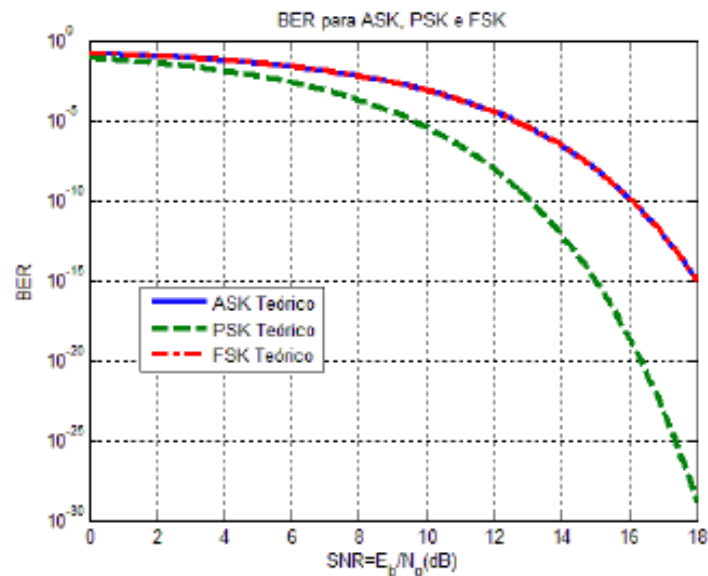


Figura 22 - Comparação do BER para as modulações de ASK, PSK e FSK (SILVA, 2009)

4.1.4. Programa de para obtenção da distância e desmodulação de um sinal

Considerando a escolha da modulação PSK, resolveu-se criar um programa que, nesta fase, se pudesse aproximar o mais possível do objectivo final. Assim, o programa final desenvolvido em MATLAB apresenta o encadeamento mostrado no diagrama de blocos da Figura 23. As variáveis apresentadas têm a mesma nomenclatura utilizada no programa desenvolvido.

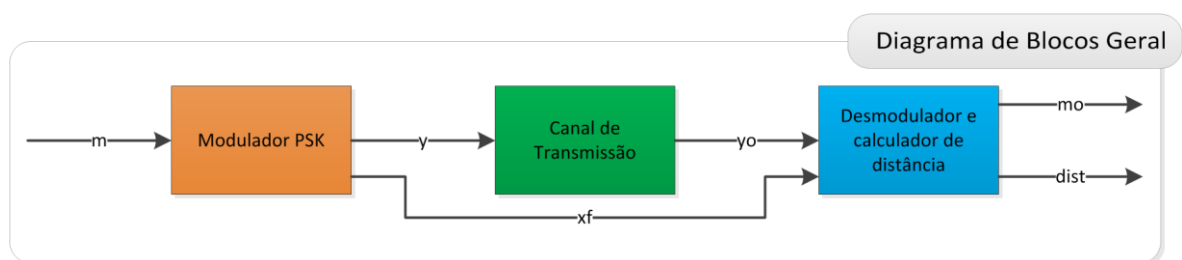


Figura 23 - Diagrama de blocos geral do programa

É possível constatar que existem três blocos principais. Inicialmente é fornecida uma determinada sequência binária m , que após passar por um modulador de PSK apresenta na sua

saída y o sinal binário modulado. Este sinal passa por um canal que inicialmente foi simulado no MATLAB através da introdução de ruído e de atraso ao sinal que sai do modulador PSK, originando o sinal de saída y_o . Posteriormente, esta aproximação foi substituída pelo canal real, ou seja, o sinal y foi aplicado num transdutor de ultra-sons e o sinal y_o é adquirido num outro transdutor que se encontra "à escuta" a partir do momento em que o primeiro começa a emissão. O último bloco está encarregue de conseguir extrair a sequência binária e a distância a que o emissor se encontra do receptor. Para isso, utiliza como variáveis de entrada o sinal PSK adquirido y_o e o sinal binário inicial com a duração do bit já definida x_f .

O primeiro bloco consiste num modulador PSK semelhante ao que se encontra descrito na literatura de sistemas de comunicação (HAYKIN, 2009). No entanto, existe uma diferença crucial que distingue ambos os modelos. Visto que o sinal binário de entrada m não se trata de um sinal com uma definição temporal, ou seja, não tem definida qual a duração de cada bit, tornava-se impossível por razões óbvias utilizar este sinal como entrada do modulador PSK. Como tal, tornava-se necessário definir diversas variáveis de maneira a que se pudesse obter a definição completa de como se desejava que o sinal fosse modulado. Definiram-se então as variáveis explicitadas na Tabela 4.

Variável	Descrição
r	Taxa de transmissão do sinal / Largura de Banda (Hz)
T_b	Duração do bit (s)
f_{as}	Frequência de amostragem da simulação em MATLAB
f_p	Frequência da portadora do sinal modulado
n_b	Número de Bits a enviar
L	Número de amostras para cada período de onda da portadora
K	Número de Períodos de onda da portadora contidos num bit
T_t	Duração total do sinal - $T_t = \frac{n_b}{r}$
N_p	Número de amostras por bit - $N_p = K \times L$
N_t	Número de amostras do sinal - $N_t = n_b \times N_p$

Tabela 4 - Variáveis definidas para definição do sinal modulado

Com a definição destas variáveis tem-se então a definição total de como será o sinal após modulação. O modulador PSK encontra-se representado na Figura 24.

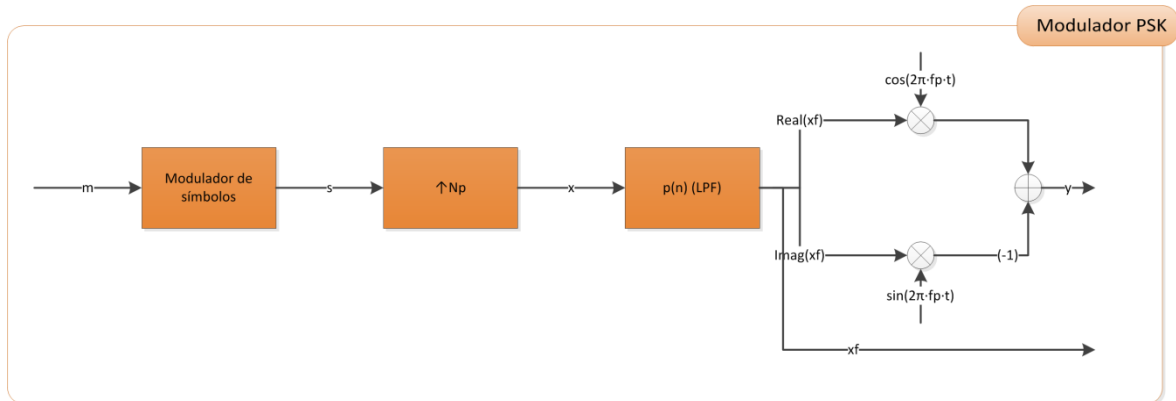


Figura 24 - Diagrama de blocos do Modulador PSK

Como é possível constatar através da análise da figura, o sinal binário m passa por um modulador de símbolos, que transforma o sinal de entrada (-1 / 1) num sinal com dois símbolos (1 / 0). Posteriormente, o sinal sofre uma interpolação e uma filtragem passa-baixo por um pulso cuja componente não nula tem o mesmo número de amostras que um bit. Assim, o sinal x_f obtido encontra-se representado na Figura 25 a vermelho. Nessa figura encontra-se também o sinal obtido após o sinal x_f , ou seja o sinal PSK y .

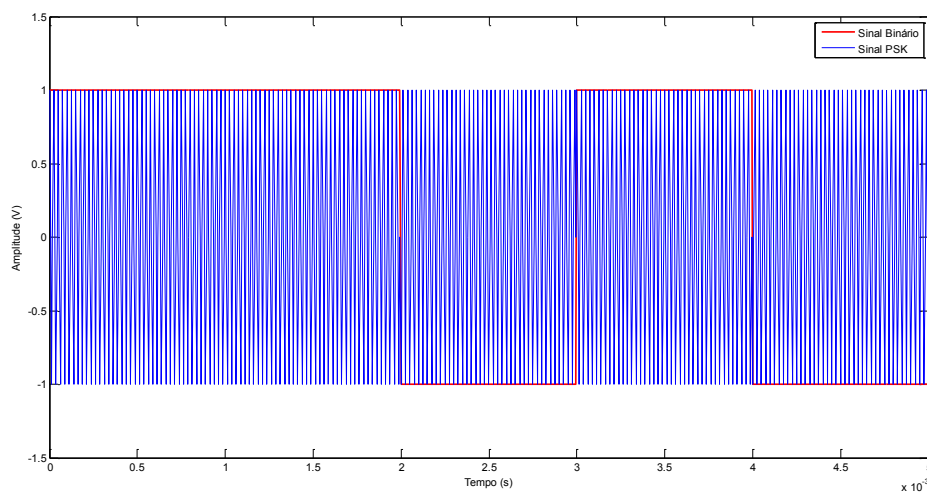


Figura 25 - Sinal binário emitido e respectivo sinal modulado PSK

Após ter sido gerado o sinal, este passa pelo canal de transmissão que como já foi referido, tanto pode ser simulado como pode ser considerado o canal real (Figura 26), caso seja realmente efectuada a transmissão e recepção do sinal através dos transdutores de ultra-sons.



Figura 26 - Experiência de transmissão de um sinal modulado PSK com dois transdutores ultrassons, um emissor e um receptor

Matematicamente o canal pode ser aproximado pelo diagrama de blocos representado na Figura 27.

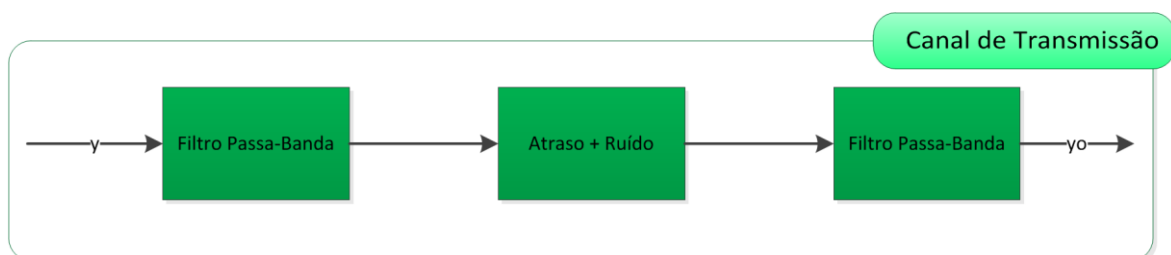


Figura 27 - Diagrama de Blocos do Canal de Transmissão

Os dois filtros passa-banda colocados ao início e ao fim da sequência pretendem representar a limitação que os transdutores possuem para a recepção do sinal acima de determinadas frequências. O bloco que se encontra colocado no meio destes representa o ruído do meio de propagação e o atraso introduzido pelo facto de a propagação não ser instantânea. É este atraso

aqui representado que posteriormente servirá para o cálculo da distância entre o emissor e o receptor.

Por fim, analisando o módulo mais complexo que consiste naquele que nos vai devolver a informação desejada, ou seja, a distância do receptor ao emissor e a mensagem inicialmente transmitida. O diagrama de blocos do módulo final encontra-se representado na Figura 28.

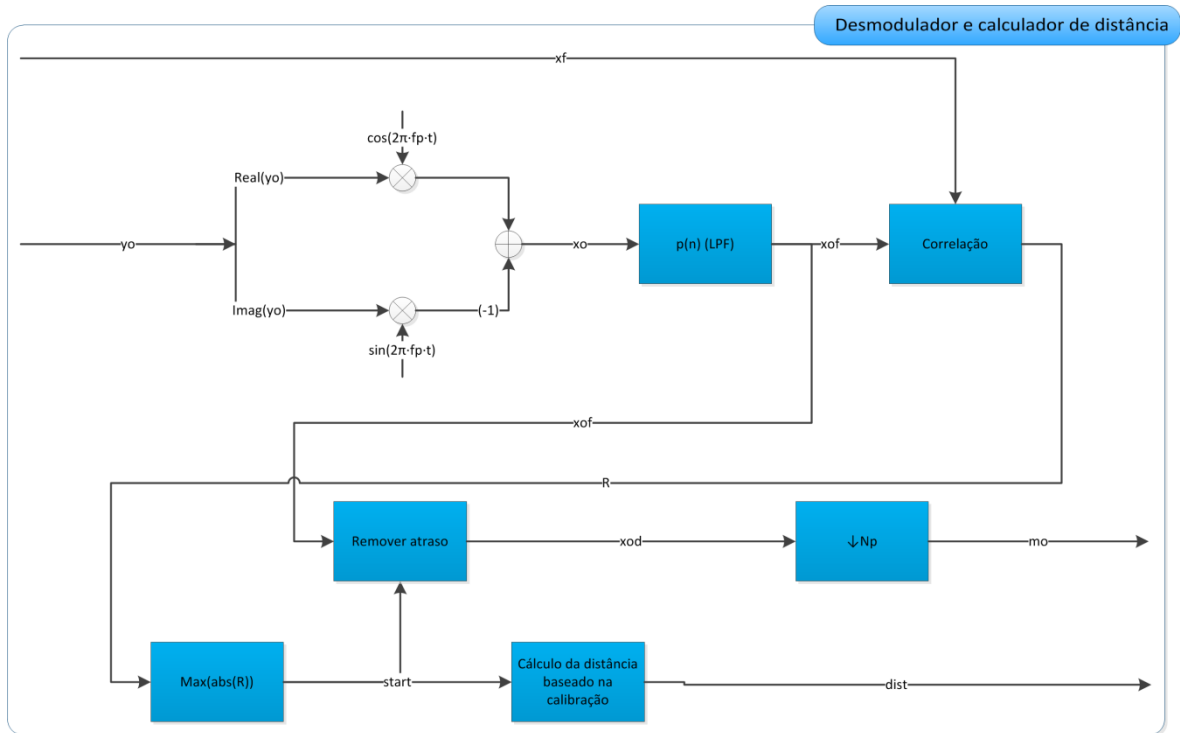


Figura 28 - Diagrama de Blocos do Desmodulador e calculador de distância

O sinal y_o proveniente do canal de transmissão passa por um desmodulador PSK. Após passar por um filtro passa-baixo, o sinal x_{of} é correlacionado com o sinal inicialmente transmitido, o sinal x_f . O máximo valor dessa operação resultará na indicação do número de amostras que o sinal se encontra atrasado, dado pela variável *start*. O bloco "Cálculo da distância baseado na calibração" simplesmente transforma o valor da variável *start*, cuja unidade é "amostras" na variável *dist*, cuja unidade é o tempo. Para efectuar este cálculo, utilizam-se valores de calibração anteriormente registados. A ideia consiste em adquirir, antes da execução do programa, diversos pontos a distâncias conhecidas e efectuar a emissão do sinal de ultra-sons e analisar qual o atraso obtido à recepção. Com os diversos valores dos pares distância e atraso,

consegue-se traçar uma recta que define o comportamento do sistema e posteriormente utilizando essa recta torna-se possível encontrar os valores da distância entre o emissor e o receptor com mais precisão. Para além disso, este método apresenta a vantagem de não necessitar do valor da velocidade da propagação do som no ar, cujo valor preciso se torna difícil de medir com precisão. A Figura 29 demonstra a maneira como se obtém a distância.

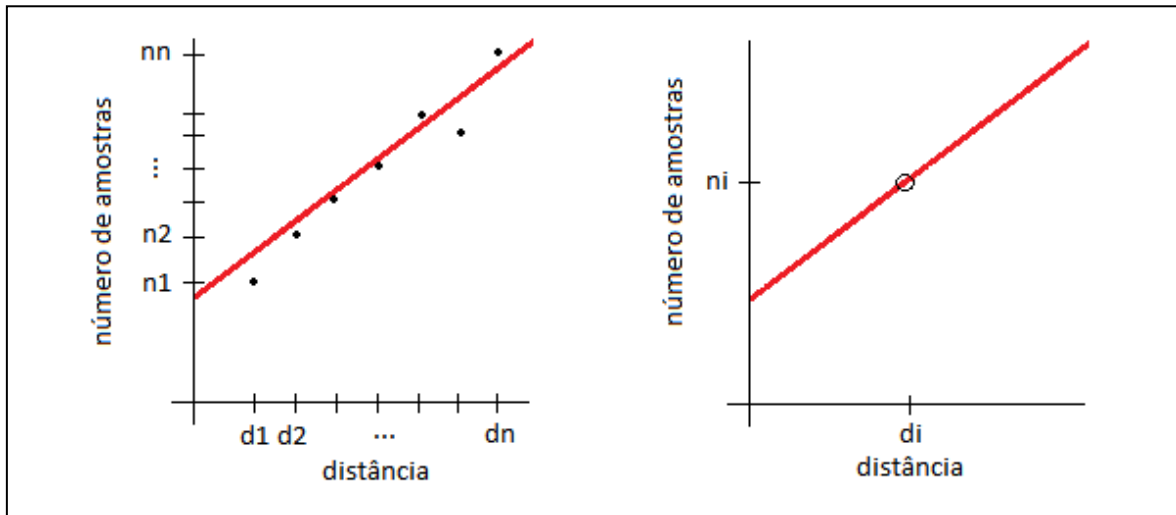


Figura 29 - À esquerda está representado o processo de calibração. O emissor é colocado a uma determinada distância do receptor (conhecida) e mede-se o número de amostras de atraso desde o início da aquisição do sinal até à aquisição do mesmo. Com sucessivas medidas consegue-se obter uma recta que descreve a tendência do sistema. À direita encontra-se representada a situação em que se pretende saber qual a distância do receptor, dado um determinado número de amostras de atraso.

Com a obtenção do atraso, pode-se remover o mesmo do sinal que foi desmodulado pelo desmodulador PSK, obtendo-se o sinal x_{od} e após decimação do mesmo, obtém-se a mensagem binária m_o .

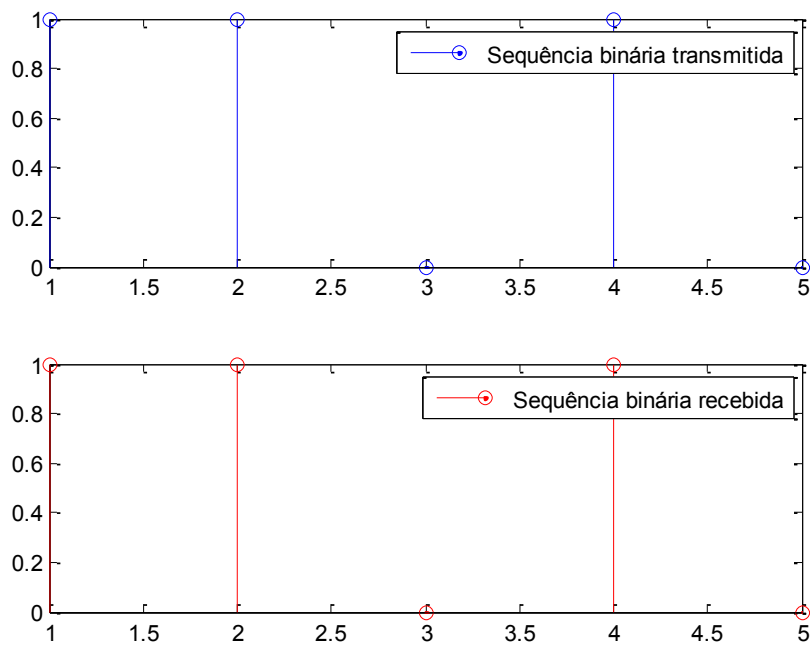


Figura 30 - Comparação entre a sequência binária emitida e a recebida

A Figura 30 representa um exemplo de um sinal binário que foi enviado e posteriormente decodificado onde o emissor e o receptor se encontravam a uma distância de 1m. É possível verificar que a desmodulação do sinal foi efectuada correctamente, dado que o sinal binário obtido é exactamente igual ao transmitido.

4.1.5. Programa de localização espacial

A maior aproximação que se realizou ao programa final de localização espacial passou por implementar um sistema com dois emissores e um receptor. De maneira a viabilizar o conceito de obter as coordenadas de um ponto através da informação da localização dos emissores e das distâncias dos mesmos ao receptor móvel, optou-se por testar o sistema a uma escala mais reduzida. Assim, definiu-se uma área quadrada com 1m^2 de área, onde os dois emissores se encontram colocados em dois vértices consecutivos e o receptor móvel é colocado em vários pontos dentro da área definida (Figura 31).

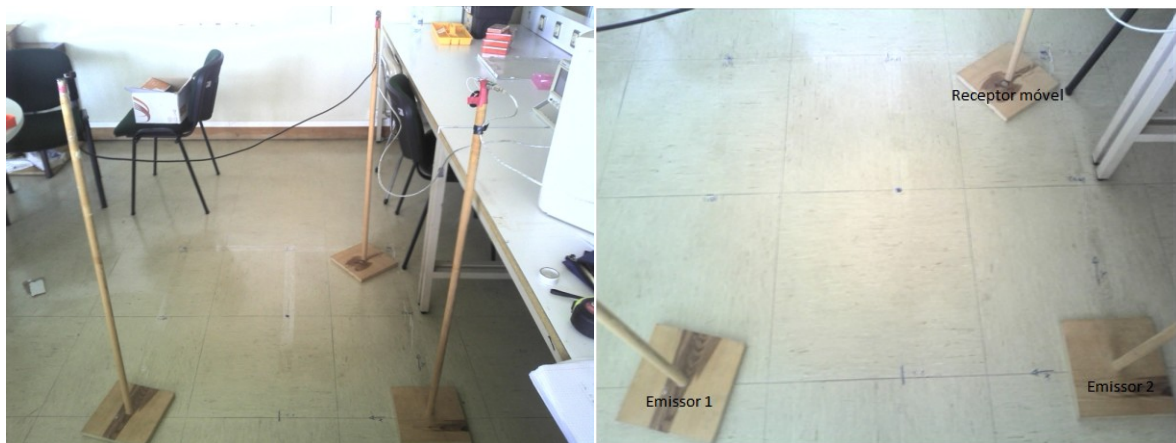


Figura 31 - Fotografias da experiência de cálculo das coordenadas de um receptor móvel através de algoritmos de trilateração

Utilizando o algoritmo anteriormente descrito, obtêm-se as distâncias entre ambos os emissores e o receptor. Com estes resultados torna-se então possível calcular as coordenadas do receptor móvel utilizando algoritmos de trilateração. A Figura 32 representa o funcionamento desse algoritmo para a situação apresentada.

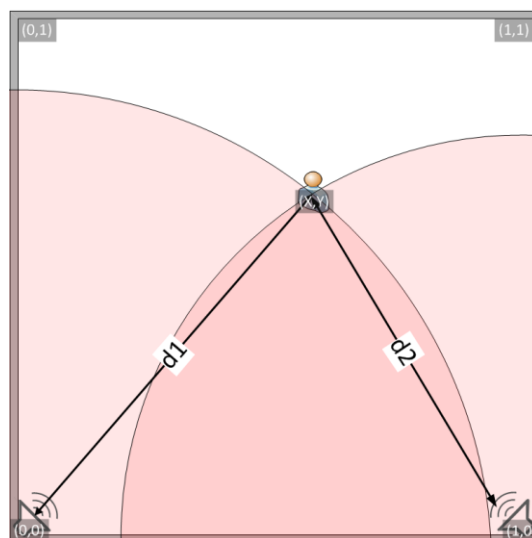


Figura 32 - Demonstração do conceito de cálculo das coordenadas através de algoritmos de trilateração

Conclui-se então que a coordenada a calcular consiste na intersecção entre as duas circunferências definidas. Essas circunferências têm o seu centro coincidente com a posição do respectivo emissor e o raio corresponde à distância anteriormente calculada. Considerando que os emissores se encontram colocados nas coordenadas representadas pela Figura 32, o ponto a calcular será então dado pelo seguinte sistema de equações:

Equação 3

$$\begin{cases} x^2 - y^2 = d_1^2 \\ (x - 1)^2 - y^2 = d_2^2 \end{cases}$$

Esta equação apresenta dois resultados diferentes, mas apenas um pode ser considerado válido dado que o outro apresenta valores inferiores a 0.

Esta técnica foi então utilizada e obtiveram-se resultados positivos, dado que se conseguia obter uma precisão na localização com um erro máximo de 1cm para cada eixo.

4.2. Solução adoptada

Tal como já foi referido no capítulo anterior, a solução final utilizou apenas um emissor móvel de ultrassons e diversos receptores colocados nas paredes, utilizando um sinal do tipo "*chirp*" ao invés de sinais com modulação PSK.

4.2.1. Hardware utilizado

Após a realização dos testes com vários componentes, optou-se por utilizar os seguintes dispositivos para o sistema de localização final:

Coluna Kemo L010

Esta coluna de som foi a escolhida para utilizar como emissor de ultra-sons, visto que apresenta um ganho aproximadamente linear com a variação da frequência, o que o torna muito versátil, pois permite-nos percorrer diversas gamas da mesma e consequentemente criar um sinal do tipo "*chirp*" (ver 4.2.2 - Software).

Microfone Panasonic WM-61A

O microfone da Panasonic foi o escolhido pois apresenta todas as características que o sistema a desenvolver necessita: a linearidade com a frequência, a omnidireccionalidade e o baixo custo.

Data Translation DT9836S

A placa Data Translation e a respectiva placa de adaptação foram utilizadas para fazer a aquisição e envio dos sinais ultra-sons por parte da coluna e do microfone. A placa foi ligada ao PC por USB, onde pode interagir facilmente com o MATLAB.

4.2.2. Software

A solução final para a determinação da distância entre o emissor e o receptor não consistiu na utilização de todos os módulos colocados na parede da sala enviarem em períodos de tempo distintos um sinal com modulação PSK. Em vez disso, optou-se pelo envio do sinal de ultra-sons apenas pelo utilizador móvel. O tipo de sinal enviado foi também alterado para um sinal do tipo "*chirp*" abrangendo uma gama de frequências entre os 10 KHz e os 50 KHz. Esse sinal é posteriormente multiplicado por uma janela do tipo "*Turkey*", de maneira a evitar mudanças muito bruscas de amplitude na coluna emissora de ultra-sons.

A principal razão pela qual se fizeram estas duas alterações está relacionada com dois factores essenciais. O primeiro consiste na necessidade de o sistema funcionar o mais rápido possível de maneira a ser o mais próximo possível de um sistema em tempo real. Desta maneira, a utilização de multiplexagem temporal levaria a que o sistema tivesse necessariamente um determinado período de tempo exclusivo para a transmissão do sinal de cada emissor, o que resultaria num grande atraso caso se pretendesse aumentar o número de emissores de ultra-sons. Assim, a opção de utilizar como emissor apenas o módulo móvel e como receptores os módulos fixos colocados na parede, permitiram que o sistema pudesse ser muito mais rápido e consequentemente possibilitar a adição de mais receptores fixos, sem que esta introdução interferisse no tempo de envio e recepção dos sinais ultrassónicos. O segundo factor está relacionado com o facto de se necessitar de enviar um sinal com uma amplitude muito elevada caso se desejasse transmitir o sinal com modulação PSK, visto que à distância que o emissor e os receptores se encontravam (acima de 5m) a SNR do sinal recebido seria muito baixa e como tal haveria muita dificuldade na desmodulação do sinal e no cálculo da distância ao mesmo. A alternativa a este problema passou pela realização da correlação cruzada entre o sinal emitido pelo módulo móvel e o sinal recebido por cada módulo receptor. Desta correlação resulta um sinal cuja abcissa do ponto máximo corresponderá ao atraso obtido pela transmissão do sinal (Figura 33).

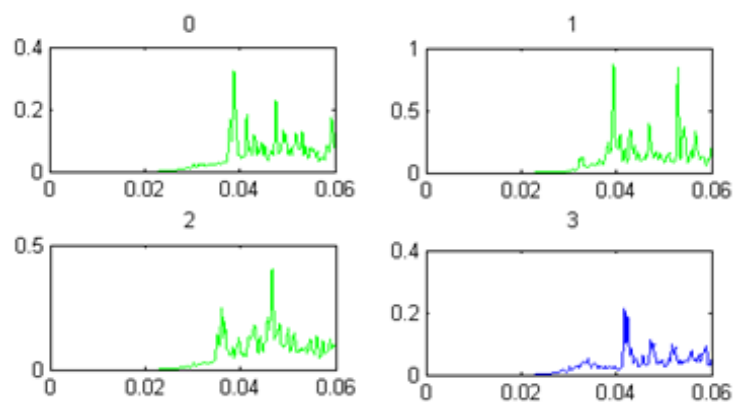


Figura 33 - Correlação do sinal emitido com os diversos sinais recebidos

Após o cálculo da distância de todos os módulos fixos ao módulo móvel, pode-se proceder ao cálculo das coordenadas na sala. Desta maneira, a sala onde foi desenvolvido e testado o sistema apresenta as dimensões expressas na Figura 34.

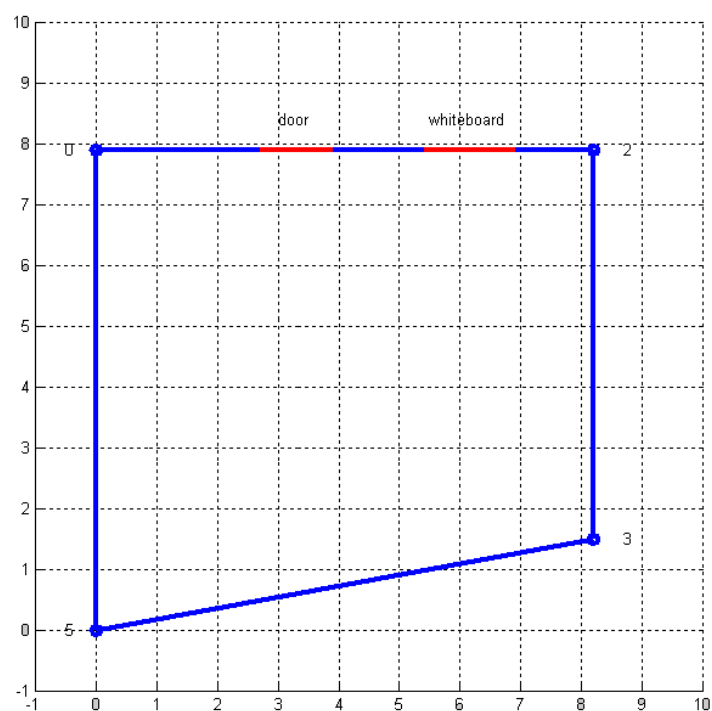


Figura 34 - Esquema com a forma e dimensões da sala utilizada para os testes

Os módulos receptores encontram-se colocados nos quatro cantos das paredes da sala, respectivamente com as coordenadas (em metros):

- Módulo 5: (0 ; 0);
- Módulo 3: (8,2;1,5);
- Módulo 0: (0 ;7,9);
- Módulo 2: (8,2;7,9).

Com a informação da distância de cada módulo fixo ao emissor e com os valores das coordenadas onde cada módulo se encontra, recorrendo a algoritmos de multilateração (SRBINOVSKA et al., 2008) torna-se possível calcular facilmente qual a coordenada onde o utilizador se encontra (Figura 35).

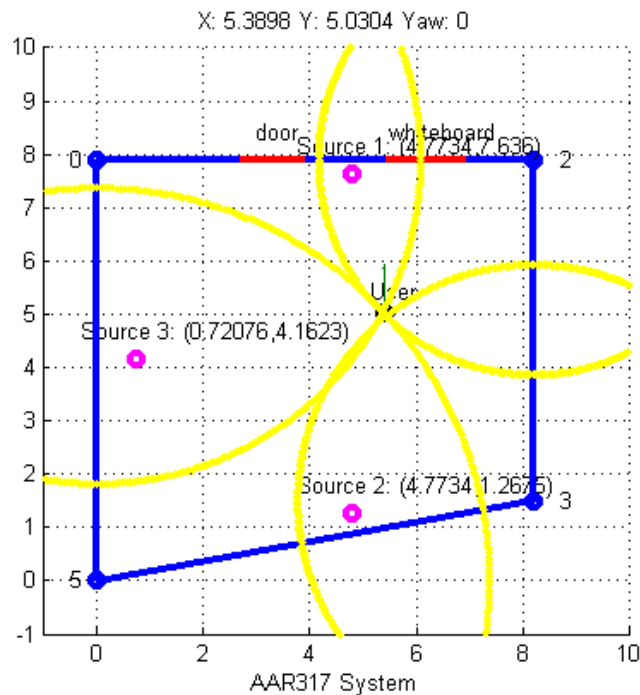


Figura 35 - Cálculo das coordenadas do utilizador através de algoritmos de multilateração

Assumindo que existem então quatro módulos dos quais se sabe quais as suas coordenadas (x_i, y_i) e existe um outro cujas coordenadas são desconhecidas (x_u, y_u) , através do Teorema de Pitágoras é possível obter as seguintes equações:

Equação 4

$$(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 = d_i \quad i = 1,2,3,4$$

Este sistema de equações pode ser então rearranjado de maneira a obter-se uma representação em função das variáveis x_u e y_u :

Equação 5

$$2 \cdot \begin{bmatrix} x_4 - x_1 & y_4 - y_1 \\ x_4 - x_2 & y_4 - y_2 \\ x_4 - x_3 & y_4 - y_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (d_1^2 - d_4^2) - (x_1^2 - x_4^2) - (y_1^2 - y_4^2) \\ (d_2^2 - d_4^2) - (x_2^2 - x_4^2) - (y_2^2 - y_4^2) \\ (d_3^2 - d_4^2) - (x_3^2 - x_4^2) - (y_3^2 - y_4^2) \end{bmatrix}$$

Nesta solução, os valores das matrizes do lado esquerdo e do lado direito da equação apresentam apenas valores de constantes conhecidas e torna-se muito fácil retirar o valor das variáveis x_u e y_u , que correspondem às coordenadas desejadas. Este algoritmo pode ser facilmente adaptado para o número de módulos que se desejarem, através da utilização da seguinte equação:

Equação 6

$$2 \cdot \begin{bmatrix} x_n - x_1 & y_n - y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n - x_{n-1} & y_n - y_{n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (d_1^2 - d_n^2) - (x_1^2 - x_n^2) - (y_1^2 - y_n^2) \\ \vdots \\ (d_{n-1}^2 - d_n^2) - (x_{n-1}^2 - x_n^2) - (y_{n-1}^2 - y_n^2) \end{bmatrix}$$

5. Orientação espacial

De maneira a atingir o principal objectivo do trabalho torna-se necessário ter um sistema que consiga fazer a monitorização da orientação da cabeça e que a partir dessa informação seja capaz de realizar o processamento de sinal adequado de maneira a que a auralização seja processada de forma correcta (HRTF) (CASALEIRO, 2008), transmitindo ao utilizador a ideia de imersão num ambiente áudio virtual.

Este capítulo surge então neste trabalho associado ao segundo problema que se teve de ultrapassar: a criação de um sistema (em *hardware*) que fosse capaz de ter como saídas as variáveis responsáveis pela orientação da cabeça. Estas variáveis são dadas habitualmente pelos ângulos de rotação sobre os eixos X,Y e Z no espaço tridimensional e são designados, respectivamente por *Roll*, *Pitch* e *Yaw*.

Uma vez que a solução desejada passava pelo desenvolvimento de um equipamento que estivesse integrado nos auscultadores, realizou-se um estudo com o objectivo de verificar qual a melhor maneira de monitorizar o movimento da cabeça. Desse estudo, concluiu-se que a melhor abordagem passaria pela utilização de *hardware* dedicado precisamente à orientação do objecto ao qual se encontra associado.

Existe porém uma gama muito vasta de sensores com capacidade de realizar orientação espacial, sendo que apresentam vantagens e desvantagens entre eles, tornando-se ainda necessário, por vezes, a utilização de diversos tipos de sensores de maneira a que seja possível obter medidas válidas. Torna-se então indispensável, no contexto do trabalho, decidir quais os equipamentos a adoptar tendo em conta a o objectivo final.

5.1. Tipos de sensores para realização de orientação espacial

A forma como habitualmente se realiza a orientação espacial consiste em incorporar diversos sensores com capacidade de medição de apenas uma variável num único sistema. Dessa maneira, torna-se possível através do processamento das informações obtidas por cada sensor realizar a orientação do sistema de uma maneira correcta e com uma precisão que depende do número e do tipo de sensores utilizados, bem como da forma como foram colocados no sistema.

Existem diversos tipos de sensores que podem ser utilizados para realização a orientação espacial no sistema em questão. Os mais importantes são os acelerómetros, giroscópios e

magnetómetros. De seguida, teremos uma breve descrição do funcionamento de cada um destes dispositivos.

5.1.1. Acelerómetros

Um acelerómetro é um sensor que permite medir a aceleração. A base de um acelerómetro consiste numa massa que está presa por molas a duas extremidades. Ao ser realizado um movimento que implique aceleração a massa é deslocada do seu ponto de repouso para um ponto onde a mola acompanha a aceleração do sistema onde está inserida (Figura 36).

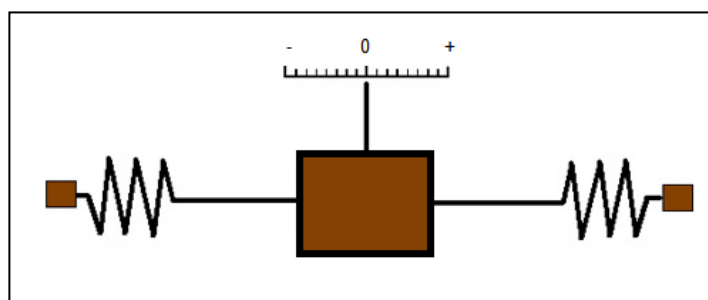


Figura 36 - Estrutura interna do conceito de funcionamento de um acelerómetro

A aceleração medida tem em conta a aceleração da gravidade, ou seja um acelerómetro que aponte ao centro da terra apresentará à sua saída a informação de 1g de aceleração.

Uma vez que os acelerómetros apenas lêem movimentos onde exista aceleração, torna-se impossível a utilização de um acelerómetro para distinção entre a situação onde o objecto está em repouso e um objecto que esteja a mover-se a uma velocidade constante, uma vez em ambos os casos a aceleração é nula. Assim, a melhor forma de usar um acelerómetro num sistema de orientação espacial consiste na sua utilização para detecção de movimentos que possam ser calculados a partir da aceleração gravítica, que está sempre presente, tal como os movimentos de rotação sobre o eixo x (*roll*) e y (*pitch*). A Figura 37 e a Figura 38 exemplificam essa aplicação no caso de o acelerómetro se queira utilizar para medir a inclinação da cabeça. No primeiro caso, existe rotação da cabeça sobre o eixo x e como tal o ângulo *roll* irá variar. Na situação de repouso, a aceleração detectada será nula, enquanto que caso a cabeça rode para a esquerda ou para a direita (relativamente ao utilizador) a aceleração interpretada pelo

acelerómetro terá respectivamente um valor positivo e negativo, tanto maior em módulo quanto maior a inclinação. A mesma interpretação deverá ser usada para movimentos de rotação da cabeça sobre o eixo y.



Figura 37 - Movimento de rotação sobre o eixo x (*roll*) detectado através de um acelerómetro tendo como referência a aceleração gravítica

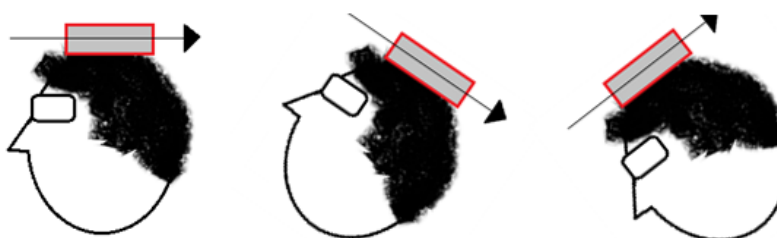


Figura 38 - Movimento de rotação sobre o eixo y (*pitch*) detectado através de um acelerómetro tendo como referência a aceleração gravítica

Os acelerómetros são também capazes de medir movimentos lineares caso esse movimento seja realizado com uma determinada aceleração. Actualmente os acelerómetros são usados numa vasta gama de equipamentos, desde telemóveis a comandos de consolas de jogos, passando por discos rígidos de computadores pessoais (Figura 39). Os acelerómetros usados nesses equipamentos correspondem habitualmente a acelerómetros de tipo MEMS (*Microelectromechanical systems*) (ANALOG DEVICES, 2009) e são comercializados como circuitos integrados. Hoje em dia existem diversas empresas responsáveis pelo fabrico destes circuitos integrados o que leva a que haja uma vasta gama de circuitos, cada um com determinadas características. A Tabela 5 apresenta alguns exemplos de circuitos integrados existentes no mercado, os respectivos preços e características relevantes. Dessas características é necessário ter em conta a relação existente entre o ruído do acelerómetro e o preço final, bem

como o número de eixos que este apresenta. Os circuitos integrados de acelerómetros contêm até três eixos, medindo independentemente a aceleração em cada um deles.



Figura 39 - Demonstração do uso de acelerómetros num iPhone para orientação do ecrã (PK GMZ ...The Blog, 2011)

Empresa	Modelo	Número de eixos	Ruído ($\mu\text{g}/\text{rtHz}$)	Corrente de alimentação	Preço
Analog Devices	ADXL325	3	250	350 μA	4,77 €
	ADXL335	3	300	350 μA	3,91 €
	ADXL345 (saída digital)	3	-	145 μA	5,11 €
	ADXL103	1	110	0,7mA	13,64 €
Freescale	MMA745xL (saída digital)	3	-	400 μA	5,71 €
	MMA8450Q (saída digital)	3	375	-	4,06 €
	MMA1260KEG	1	500	2,2mA	7,92 €
STMICROELECTRONICS	LIS302DL (saída digital)	3	-	0,3mA	12,02 €

Tabela 5 - Exemplos de circuitos integrados de acelerómetros

5.1.2. Giroscópios

Um giroscópio consiste num sensor que mede a aceleração angular ao contrário dos acelerómetros que medem aceleração linear. Esta medição é realizada através da medição da força gerada através do efeito de *Coriolis* (STMICROELECTRONICS, 2009). Ao contrário de um acelerómetro, em que a aceleração gravítica é também medida, nos giroscópios apenas as rotações angulares são medidas e os movimentos lineares não são considerados.

A mesma tecnologia MEMS utilizada na construção dos acelerómetros é também utilizada na construção de giroscópios. No caso específico dos giroscópios, a sua estrutura interna é composta por uma massa que é colocada num movimento oscilatório constante de maneira a que reaja ao efeito de *Coriolis* quando um movimento angular é aplicado ao sistema.

Os giroscópios são muito usados em aplicações semelhantes aos acelerómetros, complementando-os ou substituindo-os em determinadas funções que estes últimos não são capazes de realizar. Assim, actualmente muitos dispositivos contêm integrados giroscópios, que lhes permite obter uma grande precisão da sua orientação.

Um mercado em que estes dispositivos começam a ser muito populares é o mercado dos videojogos, onde cada vez mais se recorre a uma interacção maior entre o jogador e o jogo através da detecção de movimentos, ao invés da simples utilização de um comando (Figura 40).



Figura 40 - Comandos de consolas de videojogos que utilizam sensores de orientação (à esquerda Wiimote; à direita Playstation Move)

Uma vez que os giroscópios permitem medir a rotação sobre um eixo, caso se use um giroscópio com 3 eixos (X, Y e Z) então a rotação medida poderá ser associada respectivamente aos ângulos *roll*, *pitch* e *yaw* tal como a Figura 41 representa. No entanto, as medições realizadas corresponderão apenas a situações onde exista aceleração angular. Ou seja, para a obtenção dos valores absolutos dos ângulos anteriormente referidos, torna-se necessária uma calibração inicial, bem como a integração ao longo do tempo de diversos valores amostrados.

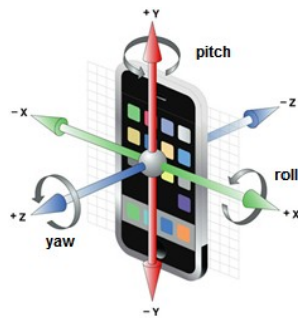


Figura 41 - Movimento de rotação dos ângulos *roll*, *pitch* e *yaw* que podem ser interpretados por giroscópios (APPLE, 2011)

Os giroscópios são fabricados por diversas empresas, sendo que cada modelo apresenta características únicas. A Tabela 6 permite estabelecer uma comparação entre alguns giroscópios presentes no mercado. Da análise dessa tabela deve-se concluir que, tal como os acelerómetros, o preço dos giroscópios varia conforme o ruído e o número de eixos que cada um é capaz de efectuar medições.

Empresa	Modelo	Número de eixos	Gama de medição (dps – degress per second)	Ruído (dps/rtHz)	Corrente de alimentação	Preço
STMICROELECTRONICS	LY3200ALH	1 (Yaw)	2000	0.074	4.2mA	7.21 €
	LPY4150AL	2 (Pitch, Yaw)	1500	0.075	6.8mA	7.21 €
	LPR450AL	2 (Roll, Yaw)	500	0.025	6.8mA	7.21 €
	L3G4200D	3 (Pitch, Yaw, Roll)	250/500/2000	0.03	6.1mA	9.31€
ANALOG DEVICES	ADXRS450	1 (Yaw)	300	0.015	50µA	68.01€
INVENSENSE	IDG-500	2 (Pitch, Roll)	500	0.8	7mA	16.34€
	IMU-3000	3 (Pitch, Yaw, Roll)	2000	0.1	6.1mA	35.94€
	ISZ-650	1 (Yaw)	2000	0.3	4.5mA	9.84€

Tabela 6 - Exemplos de circuitos integrados de giroscópios

5.1.3. Magnetómetros

Um magnetómetro consiste num sensor que tem como objectivo medir a força do campo magnético. Tendo em conta que a Terra apresenta um campo magnético com uma intensidade de aproximadamente 0.5 *gauss*, torna-se possível medir a força do mesmo. De maneira a ser medida a direcção do mesmo, utilizam-se 3 magnetómetros com a direcção segundo os eixos X, Y e Z. Desta maneira, conjugando a força em cada direcção, torna-se possível obter a orientação

do campo magnético terrestre. Considerando que o campo magnético terrestre aponta sempre para o norte magnético (que se encontra desfasado de $\pm 20^\circ$ do norte geográfico, dependendo do local onde é efectuada a medição), torna-se possível utilizar este equipamento para medição da orientação da cabeça, tendo em conta um ponto de referência fixo.

No entanto, deve-se ter em conta que neste tipo de sensores a precisão é inferior à dos acelerómetros e giroscópios. Uma outra desvantagem dos mesmos consiste no facto de campos magnéticos exteriores provocarem interferência na medição do campo magnético terrestre, adulterando os resultados.

Estes sensores encontram-se presentes actualmente em muitos equipamentos, nomeadamente sistemas de navegação GPS. Nestes sistemas, o magnetómetro é utilizado para calcular a orientação do utilizador no mapa, reduzindo os erros na navegação.

Tal como nos sensores anteriormente referidos, existem muitos fabricantes de magnetómetros. A Tabela 7 apresenta um resumo de alguns circuitos integrados e sensores vendidos pelos fabricantes.

Empresa	Modelo	Tipo de actuação magnética	Corrente de alimentação	Tensão de alimentação	Tempo de subida / Tempo de descida da saída	Preço
OPTEK	OHN3140U	Unipolar	4 mA	24 V	0.21 μ s / 0.10 μ s	3.71 €
Honeywell	VF526DT	Bipolar	14 mA	24 V	1.5 μ s / 1.5 μ s	3.75€
	HMC5843 (Circuito integrado)	Anisotropic Magnetoresistiv	0.8 mA	1.8 V	-	35.43€

Tabela 7 - Exemplos de circuitos integrados e sensores de magnetómetros

5.1.4. Sistemas com vários sensores

Por vezes a utilização de apenas uma categoria de sensores não é suficiente e como tal utilizam-se combinações de diversos sensores. A este nível encontram-se então diversas configurações diferentes. Uma delas consiste em colocar diversos sensores no mesmo circuito integrado, ao qual se pode aceder individualmente aos valores obtidos por cada um. Nesta situação a vantagem reside apenas na necessidade de uso de apenas um circuito integrado.

Outra das configurações encontradas baseia-se na adição de mecanismos de correcção de erros ao sistema anterior, sendo que o sinal de saída já apresenta resultados mais fiáveis. A este tipo de sistemas dá-se o nome de *Inertial Navigation Unit* (KING, 1998), onde são compostos habitualmente por três giroscópios (*Pitch, Yaw, Roll*) e três acelerómetros (X, Y, Z), com a possibilidade de terem ainda integrados magnetómetros. A saída deste tipo de sistemas consistem em três variáveis, contendo estas a informação da posição, velocidade e orientação do objecto ao qual se encontram acoplados. Este tipo de sistema, é habitualmente utilizado em fins militares, tais como aviões, submarinos ou mísseis guiados dada a sua capacidade de definir totalmente a localização e orientação de um objecto.

Ambas as configurações apresentadas são vendidas pelos principais fabricantes de sensores em circuitos integrados. A Tabela 8 apresenta alguns circuitos integrados mais vendidos.

Empresa	Modelo	Sensores	Graus de liberdade	Características relevantes	Preço
ANALOG DEVICES	ADIS16405 BMLZ	Acelerómetro, Giroscópio e Magnetómetro	9	Sistema digital com calibração incluída, compensação dinâmica para cada sensor e auto-correcção para as variações dos valores do magnetómetro com a temperatura.	613,29 €
SPARKFUN	SEN-10736	Acelerómetro, Giroscópio e Magnetómetro	9	Circuito integrado da Sparkfun que integra na mesma placa o giroscópio ITG-3200, o acelerómetro ADXL345 e o magnetómetro HMC5883L. As saídas de todos os sensores são processadas por um ATmega328 e a saída é feita através de interface série	90.69 €
	SEN-09268	Acelerómetro e Giroscópio	5	Circuito integrado da Sparkfun que integra na mesma placa o giroscópio IDG500 e o acelerómetro ADXL335. As saídas do circuito integrado consistem nas saídas dos circuitos dos sensores.	32.62 €
POLOLU	MinIMU-9	Acelerómetro, Giroscópio e Magnetómetro	9	Circuito integrado da Pololu que integra na mesma placa o giroscópio L3G4200D, o acelerómetro/magnetómetro LSM303DLH. As saídas de todos os sensores são processadas por um ATmega328 e a saída é feita através de interface série.	36.25 €

Tabela 8 - Exemplos de circuitos integrados de sistemas com vários sensores.

5.2. Solução Adoptada

Tendo em conta que o objectivo inicial do trabalho consistia em ter uma versão de demonstração final de um sistema de realidade aumentada áudio a funcionar, deu-se uma maior ênfase à capacidade de atingir o objectivo final em detrimento de uma aproximação maior à solução ideal no nível técnico. Desta maneira, optou-se pela utilização de um sistema que tivesse as seguintes características:

- Configuração fácil a nível de *hardware*;
- Facilidade de transmissão dos dados adquiridos do sensor para o programa a correr no PC;
- Correção de erros e calibrações realizadas pelo próprio sensor.

Considerando estas características, a escolha ficaria reduzida à utilização de um sistema comercial de orientação. Assim, tentou-se verificar se dentro do grupo de investigação em que o projecto estava inserido (IEETA) existia um destes sistemas que pudesse ser reutilizado. Chegou-se então à conclusão que se encontrava disponível o sistema IntertiaCube3 da empresa Intersense (Figura 42). Este sistema apresenta então as seguintes características:

- 3 graus de liberdade com uma rotação de 360°;
- Precisão de 1° para *Yaw*, 0.25° para *Pitch* e *Roll*;
- 180 Hz taxa de actualização;
- 4 ms de latência;
- Filtros de saída e sensibilidade da rotação ajustáveis;
- Calibração do magnetómetro para compensação de campo magnético estático;
- Possibilidade de obter os dados do Giroscópio, Acelerómetro e Magnetómetro;
- Interface USB ou RS-232;
- *Software* Windows para calibração e configuração;
- Possibilidade de envio de trama UDP com os dados adquiridos em tempo real.



Figura 42 - Sistema de orientação IntertiaCube3 da Intersense

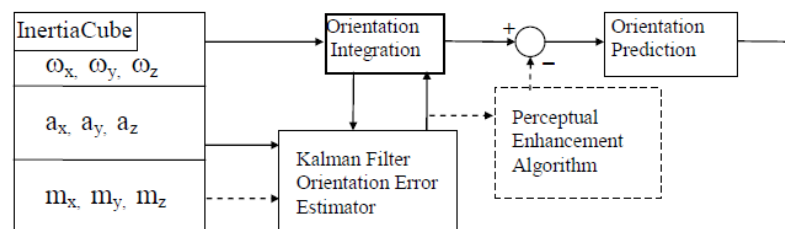


Figura 43 - Diagrama de blocos do Sistema de orientação IntertiaCube3

Como se pode constatar, este equipamento possui todas as características exigidas:

- Não exige qualquer configuração a nível de *hardware*, apenas a conexão entre o PC e o sensor, através de USB ou RS-232;
- Uma vez que o programa final será escrito em MATLAB, este possui bibliotecas para comunicação série (caso o sensor seja ligado através de RS-232) e de comunicação UDP (caso o sensor seja ligado por USB, ou esteja ligado a outro PC);
- O *software* disponível permite ao utilizador ajustar a maneira como os valores lidos pelos sensores são tratados posteriormente, através da modificação de diversos parâmetros.

Desta maneira, para este projecto escolheu-se utilizar este sistema. Optou-se pela utilização de comunicação através de USB, dado que no modelo disponível apenas existia este adaptador.

Neste caso, o sistema operativo utilizado foi o Windows XP. Neste sistema operativo, o adaptador USB emula uma porta série que estabelece comunicação com o PC, nomeadamente o *software* da Intersense. Existem diversos programas fornecidos com o produto para além de um

SDK com bibliotecas para Windows, Windows CE, Linux, HP-UX, SGI IRIX e Max OS X. Os principais programas são o *IsDemo* e o *IServer*. O primeiro fornece uma interface gráfica bastante intuitiva para visualização da orientação do sensor no ecrã do computador. Permite ainda realizar a alteração de algumas configurações, sendo esta a ferramenta ideal para testes e adaptação ao comportamento do sensor. O segundo programa consiste naquele que se vai revelar mais útil para este projecto em questão, uma vez que apresenta a capacidade de ler os dados do sensor à máxima velocidade permitida pelo sistema operativo. Assim, uma ou mais aplicações poderão comunicar com este programa utilizando a biblioteca da Intersense, ou através da captura de pacotes UDP que este mesmo programa poderá enviar para um IP específico. Face a estas opções, optou-se pela última, uma vez que o MATLAB tem ao seu dispor bibliotecas que permitem realizar com bastante facilidade e rapidez a aquisição de tramas UDP. Caso no programa *IServer* se configurasse o IP de destino como o IP do próprio computador, todo o processo seria realizado localmente. Por outro lado, caso se tivesse optado pela utilização das bibliotecas da Intersense, seria necessário escrever um programa noutra linguagem (C, Visual Basic, etc) e/ou optar pela utilização de MEX-files para interacção com o MATLAB.

5.2.1. Software desenvolvido - MATLAB

O programa desenvolvido em MATLAB para aquisição dos valores registados pelo sensor tem como objectivo inicial detectar a trama UDP que se encontra a ser transmitida sucessivamente pelo programa *IServer* da Intersense. Neste, são configurados os campos do IP para onde se pretende que a trama seja transmitida, a porta de rede a utilizar e o tipo de pacotes a enviar (*Standard* ou *Extended* - inclui todos os dados enviados pela *Standard* e ainda informação específica dos valores dos giroscópios, acelerómetros e magnetómetro). Uma vez que se pretende realizar tudo no mesmo PC, o campo do IP terá de ser preenchido com o IP do computador que está a ser utilizado e a porta poderá ser qualquer uma, desde que não esteja a ser utilizada por outras aplicações. O tipo de dados escolhido consistiu nos dados *Standard*, dado que a partir destes é possível extrair a informação dos ângulos *Pitch*, *Yaw* e *Roll*. Esta afirmação pode ser comprovada através da observação da estrutura do pacote UDP:

```

typedef struct
{
    unsigned char StartByte;
    unsigned char PacketType;
    unsigned char PacketSeqNum;
    unsigned char CheckSum;

    unsigned char Model; // tracker model
    unsigned char StationNum;

    unsigned char TrackingStatus; // tracking status byte
    unsigned char ButtonState;

    unsigned char AnalogData[8];

    float Orientation[3]; // Euler angles, yaw, pitch, roll
    float Position[3]; // Always in meters
    float TimeStamp; // Seconds, reported only if requested
}

```

Consegue-se chegar facilmente à conclusão que o pacote UDP emitido apresenta um tamanho fixo de 44 Bytes e que os campos que se tornam necessários de ler consistem nos Bytes 17 a 20 para o ângulo *Yaw*, 21 a 24 para o ângulo *Pitch* e 25 a 28 para o ângulo *Roll*. O objectivo do programa a desenvolver no MATLAB será então ler correctamente os valores destes bytes e disponibilizá-los ao utilizador.

Com base na informação anteriormente apresentada criou-se então a função *[Yaw, Pitch, Roll] = readIntersense(ip,port)*. Os parâmetros de entrada da função são o IP do PC onde o MATLAB vai ler a trama UDP e a respectiva porta de rede. Os parâmetros de saída consistem nos ângulos *Yaw*, *Pich* e *Roll*, sendo que neste caso específico apenas interessa a direcção para onde o utilizador se encontra virado (*Yaw*). Porém, tendo em conta a perspectiva de evolução deste trabalho e a reutilização do trabalho já desenvolvido por futuros alunos ou investigadores, optou-se por desenvolver já uma função que devolva todos os ângulos necessários.

5.3. Aproximação ao sistema ideal

Tendo em consideração o sistema ideal inicialmente planeado (secção 3.1) optou-se ainda por desenvolver algum trabalho de pesquisa e implementação de maneira a que este se aproximasse mais do objectivo final. Como tal, após uma pesquisa, seleccionou-se um circuito integrado que pudesse satisfazer as necessidades exigidas. Este circuito consistiu no LSM303DLH da STMicroelectronics e apresenta as seguintes características principais:

- Acelerómetro de 3 eixos;
- Magnetómetro de 3 eixos;
- Interface série I²C;
- 16 bits saída;
- Tensão de alimentação: 2.5 a 3.3V;
- Tensão de alimentação comunicação digital: 1.8V;
- Modo *power-down*;

Existem diversas razões pelas quais este foi o circuito eleito. Em primeiro lugar, apresenta disponíveis um acelerómetro de três eixos e um magnetómetro de três eixos. Estes dois sensores permitem satisfazer completamente o objectivo inicial uma vez que o magnetómetro permite saber qual a sua direcção relativamente ao norte magnético. Desta maneira, sabendo esta referência torna-se possível saber para onde o utilizador se encontra virado. O uso do acelerómetro permite medir a variação dos ângulos *Pitch*, *Yaw* e *Roll* de maneira a efectuar compensação sobre o valor medido pelo magnetómetro (STMICROELECTRONICS, 2010).

Uma vez que os valores de saída deste sistema não consistem nos ângulos *Pitch*, *Yaw* e *Roll*, torna-se necessário ligar um microcontrolador de maneira a ler os valores de saída, interpretá-los e convertê-los nos valores desejados. Para além disso, o sensor não apresenta nenhum filtro integrado, pelo que a filtragem dos valores adquiridos terá que ser feita posteriormente. Assim, tal como referido na secção 3.2.2, utilizou-se o MSP430 da Texas Instruments. uma das razões pela qual se escolheu este circuito integrado foi o facto de quer o sensor, quer o microcontrolador podem comunicar através do protocolo I²C e ambos utilizam tensões de alimentação de 3.3V, sendo possível alimentar o sensor através da alimentação utilizada pelo o microcontrolador.

Tendo em conta que se pretende estabelecer comunicação entre ambos os componentes através do protocolo I²C, tornava-se necessário realizar algumas conexões entre os mesmos. O esquema típico de configuração encontra-se representado na Figura 44.

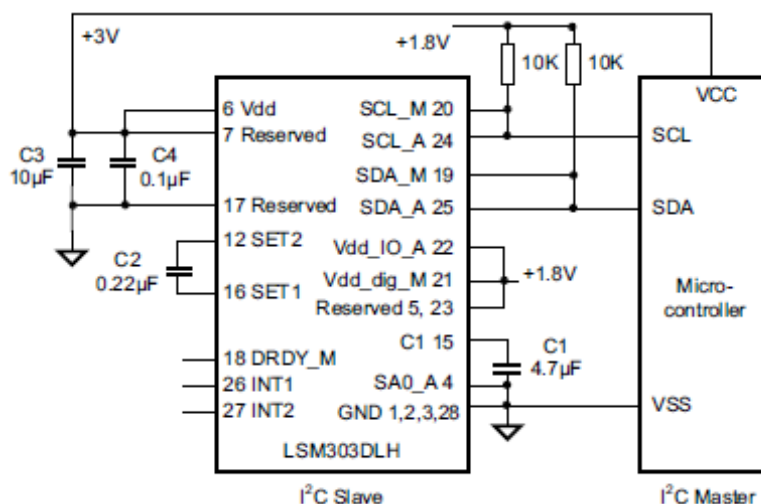


Figura 44 - Montagem utilizada para realizar comunicação por I²C com o LSM303DLH (STMICROELECTRONICS, 2010)

De maneira a evitar o desenho de uma placa com o circuito e os componentes acima apresentados integrados, procurou-se encontrar um circuito que já tivesse todas as conexões necessárias realizadas. Assim, após pesquisa, conseguiu-se obter uma placa, desenvolvida pela Pololu, que incluía todas as conexões necessárias, a um preço que seria pouco mais do que a soma de cada componente individualmente.

Utilizando então esta placa em conjunto com o microcontrolador MSP430, desenvolveram-se os *device drivers* necessários para estabelecer a comunicação I²C. Foram também escritas as funções para o MSP430 que permitem o envio e leitura de informação. Essas funções foram escritas em C, utilizando como IDE o *Code Composer Studio* da Texas Instruments. Durante a escrita destes programas foi necessário interpretar a maneira como é realizada a comunicação I²C, bem como perceber como é possível aceder aos registos internos do LSM303DLH. Analisando o *datasheet* do mesmo, encontraram-se as tabelas que se encontram em anexo, na secção 10.3.

Tomando como exemplo a transferência de um *byte* do *Master* (microcontrolador) para o *Slave* (sensor), verifica-se que, em termos de transmissão de informação, ocorre a seguinte sequência:

1. Envio da condição *Start* por parte do *Master* (definida como uma transição de *High* para *Low* da linha de dados SDA, enquanto a linha SCL se encontra a *High*). Após esta transmissão, o barramento é considerado como ocupado.
2. Envio de um *byte* onde o endereço do *Slave* (acelerómetro ou magnetómetro) corresponderá aos primeiros 7 bits e o 8º bit indicará se o *Master* está a transmitir ou a receber dados a partir do *Slave*. Como neste caso é uma operação de transmissão, o oitavo bit será 0, caso contrário seria 1.
3. Envio do sinal de *Acknowledge* caso a recepção do *byte* anterior tenha sido efectuada com sucesso e se o endereço for válido.
4. Envio do sub-endereço (por exemplo, o registo do eixo X do acelerómetro) ao qual se pretende aceder por parte do *Master*, sendo que o bit mais significativo indica se se pretende que o endereço seja incrementado automaticamente (para permitir leituras/escritas sucessivas) e os restantes bits correspondem ao endereço em si.
5. Envio do sinal de *Acknowledge* caso a recepção do *byte* anterior tenha sido efectuada com sucesso e se o sub-endereço for válido.
6. Envio do *byte* de dados por parte do *Master*.
7. Envio do sinal de *Acknowledge* caso a recepção do *byte* de dados tenha sido efectuada com sucesso.
8. Envio da condição de *Stop* por parte do *Master* (transição de *Low* para *High* da linha SDA enquanto SCL se encontra no estado *High*).

Para que a sequência anterior seja realizada com sucesso, torna-se necessário atribuir valores a determinados registos do MSP430, bem como fazer verificação dos mesmos. Os programas desenvolvidos têm então como base a informação disponibilizada no *datasheet* do LSM303DLH (maneira como a comunicação deve ser realizada e definições de endereços e sub-endereços) e do MSP430 (configuração dos registos do MSP430 de maneira a que execute os passos anteriormente descritos).

Simultaneamente com este trabalho, procurou-se também uma forma de estabelecer comunicação sem fios entre o sensor e o PC. A solução adoptada passou pela utilização de dois microcontroladores MSP430, estando um ligado ao sensor e outro ligado ao PC a correr o programa em MATLAB. Para estabelecer a comunicação tiveram-se várias situações em conta. Em primeiro lugar, verificou-se que a driver do adaptador USB do MSP430 utilizado para efeitos de programação/*debugging* permitia também simular uma interface de uma porta série RS-232, facto que poderia facilitar uma troca de dados entre o MSP430 e o MATLAB. Aliado a este factor,

existiam disponíveis no SDK do MSP430 alguns programas de exemplo que utilizavam precisamente a comunicação entre dois microcontroladores, simulando um "chat" entre ambos. Para realizar essa comunicação utilizavam o protocolo *SimpliciTi*, um protocolo de redes RF *low-power*, desenvolvido pela Texas Instruments, destinado à utilização em redes de pequenas dimensões. A comunicação é estabelecida através dos *transceivers* CC2500 presentes em cada kit eZ430-RF2500 (INSTRUMENTS, 2007). Procurou-se então trabalhar sobre esse programa, modificando-o de maneira a que fosse possível utilizá-lo para enviar informação através de uma trama desde o microcontrolador acoplado ao sensor até ao que se encontrava ligado ao computador.

Apesar de os programas acima mencionados terem sido desenvolvidos, acabaram por não ser implementados pelo facto de existirem diversos *bugs* no módulo I²C, cuja resolução obrigaria a um esforço temporal que estaria incompatível com os prazos inicialmente delineados. No entanto, tendo em conta que este projecto prevê continuidade, o trabalho até então desenvolvido nesta secção poderá ser reutilizado e, após algumas correcções, facilmente integrado no sistema final.

6. Auralização

A auralização trata-se de uma técnica que permite a reprodução de um som tendo como base dados computacionais, de maneira a reproduzi-los num ambiente virtual (VORLÄNDER, 2008). Em suma, a auralização consiste na técnica necessária para transformar um sinal sonoro fixo tipo *mono*, num outro sinal sonoro de dois canais de maneira, no qual se pode ter a sensação de que esse som se encontra numa determinada localização. Essa transformação tem como variáveis de entrada a distância do utilizador à fonte sonora e a sua orientação em relação à mesma. Estas duas informações são então fornecidas pelos sistemas de localização e orientação, respectivamente, que foram explicados nos dois capítulos anteriores.

De maneira a proceder à implementação desta técnica no nosso sistema, torna-se necessário perceber primeiro quais as suas limitações. A principal limitação neste campo reside no facto de não se estar a utilizar processamento em paralelo, ou seja, o processamento é sequencial, sendo que em termos de código, a próxima linha só é executada após a execução da actual. Esta limitação irá impor que os ficheiros de som utilizados não possam ter uma duração muito grande, pois caso contrário, seriam reproduzidos desde o início até ao fim tendo como base os dados de localização e orientação obtidos antes da reprodução do som, ou seja, caso o utilizador se movimentasse pela sala o som que ele ouviria não mudaria, o que não aproximaria o nosso sistema a um sistema de tempo real. Assim, de maneira a obter uma maior sensação de imersão, procurou-se utilizar sons com a menor duração possível, como por exemplo notas de guitarras ou baixos.

Após a análise de como o sistema teria de ser tratado, verificou-se que existiam diversas formas de efectuar a auralização, sendo essas abordagens explicadas de seguida.

6.1. Auralização utilizando diferenças de volume

A primeira abordagem à auralização passou pela implementação de um programa que simplesmente variava o volume transmitido aos auscultadores dependendo da posição do utilizador. O volume era então variado de duas maneiras. A primeira consistia na distância entre o utilizador e a fonte, sendo que esta variação era igual quer para o canal esquerdo, quer para o canal direito. A variação do volume era então inversamente proporcional à distância, ou seja, a atenuação que depende da distância da fonte ao utilizador é dada por:

Equação 7

$$\alpha_d = \frac{1}{d}$$

Onde d corresponde à distância entre a fonte e o utilizador. Esta distância é obtida através do cálculo do módulo do vector entre a fonte sonora e o utilizador. Considerando que o utilizador tem como coordenadas (X_u, Y_u) e que a fonte tem como coordenadas (X_e, Y_e) , a distância é obtida através da equação:

Equação 8

$$d = \sqrt{(X_u - X_e)^2 + (Y_u - Y_e)^2}$$

Após o cálculo da atenuação relativamente à distância, tornou-se necessário calcular a atenuação originada pela orientação da cabeça. O conceito aqui utilizado foi bastante simples, visto que se optou por atribuir atenuação nula quando o ouvido se encontra directamente virado para a fonte sonora e atenuação máxima quando o ouvido se encontra na direcção oposta da fonte sonora. Este procedimento obrigava, em primeiro lugar, à medição do ângulo entre o utilizador e a fonte sonora, ao invés do ponto anterior onde bastava a medição do módulo do vector. Assim, considerando que o vector $v = (v_x, v_y)$ corresponde ao vector entre o utilizador e a fonte sonora, o ângulo em graus pode ser calculado através da expressão apresentada na Equação 9.

Equação 9

$$\emptyset = \arctg\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \times \frac{360}{2\pi}$$

Porém esta expressão não é suficiente para definir o ângulo desejado, sendo necessário conjugar a informação anterior com o quadrante onde o ângulo se encontra (Figura 45). Esta última informação pode ser obtida simplesmente através da verificação dos sinais das coordenadas do vector. Assim, verifica-se que, considerando o sentido positivo do eixo y como ponto de referência, o ângulo final é obtido através das seguintes expressões:

Equação 10 - 1º Quadrante e 4º Quadrante

$$\theta = \phi - 90$$

Equação 11 - 2º Quadrante e 3º Quadrante

$$\theta = -(\phi + 90)$$

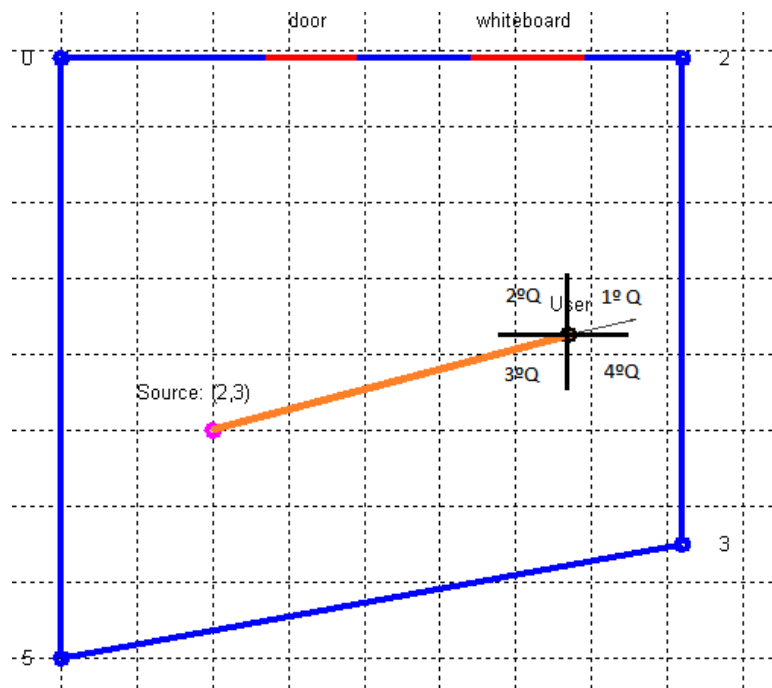


Figura 45 - Representação do referenciais utilizados para calcular os ângulos

Após o cálculo deste ângulo tinham-se então todas as variáveis de entrada necessárias para conseguir implementar o objectivo acima descrito. O ângulo de entrada para a função que calculará a atenuação será então a diferença entre o ângulo para o qual o utilizador no momento se encontra direccionado e o ângulo da fonte relativamente ao utilizador, ou seja:

Equação 12

$$\varphi = \text{mod}((\theta - \text{Yaw}) + 180), 360) - 180 \text{ (Figura 46)}$$

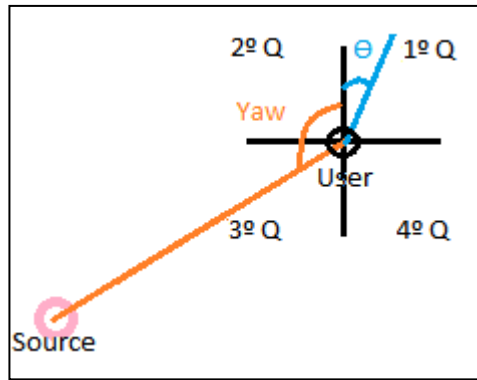


Figura 46 - Relação entre o ângulo fornecido pelo sensor de orientação e o ângulo da fonte relativamente ao utilizador

Esta expressão permite a obtenção de um ângulo com valores entre os -180° e os 180° e onde a função do MATLAB $\text{mod}(a,b)$ devolve o resto da divisão de a por b .

A função que foi utilizada para processar esta informação encontra-se representada na Figura 47. A título de exemplo, considere-se que o utilizador tem a fonte à sua esquerda, ou seja, situada a -90° relativamente à direcção da sua cabeça. Neste caso, a atenuação para o canal direito é máxima (igual a zero) enquanto que a atenuação para o canal esquerdo é mínima (igual a 1).

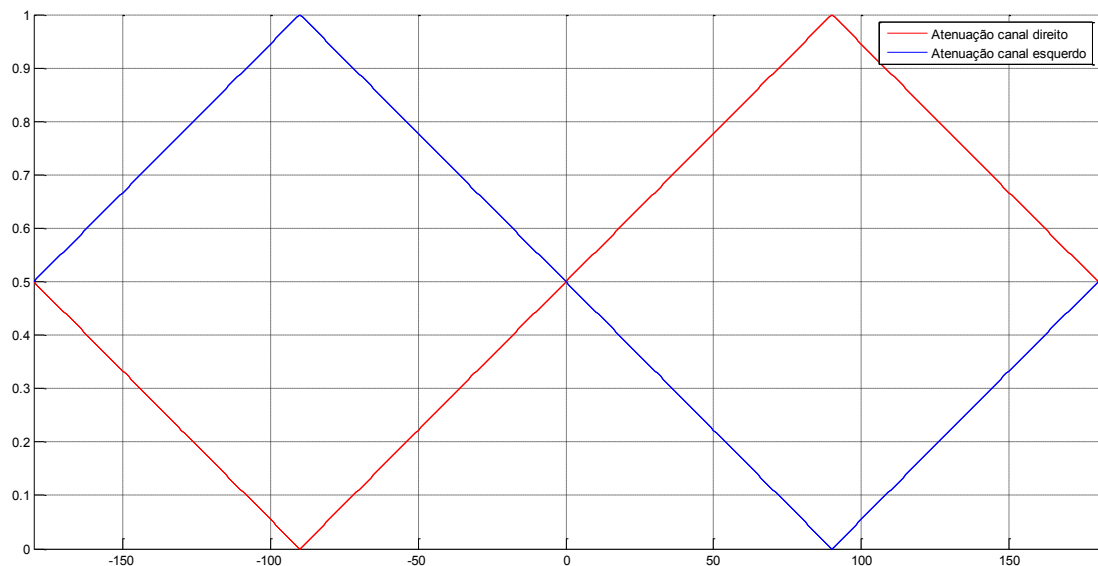


Figura 47 - Função inicialmente utilizada para gerar o sinal sonoro a partir da informação da orientação da cabeça relativamente à fonte sonora

As expressões utilizadas para gerar este sinal foram então as seguintes:

Fonte situada entre -180º e -90º:

Equação 13 - Atenuação canal esquerdo

$$\alpha_{ol} = \frac{\varphi + 180}{180} + 0.5;$$

Equação 14 - Atenuação canal direito

$$\alpha_{or} = -\frac{\varphi + 180}{180} + 0.5$$

Fonte situada entre -90º e 90º

Equação 15 - Atenuação canal esquerdo

$$\alpha_{ol} = -\frac{\varphi}{180} + 0.5$$

Equação 16 - Atenuação canal direito

$$\alpha_{or} = \frac{\varphi}{180} + 0.5$$

Fonte situada entre 90º e 180º

Equação 17 - Atenuação canal esquerdo

$$\alpha_{ol} = \frac{\varphi + 180}{180} - 1.5$$

Equação 18 - Atenuação canal direito

$$\alpha_{or} = -\frac{\varphi - 180}{180} + 0.5$$

Com todas estas informações pode-se então calcular o sinal final a reproduzir. Assim, para o canal esquerdo tem-se a expressão:

Equação 19

$$L = aud_{mono} \times \alpha_d \times \alpha_{ol}$$

e para o canal direito:

Equação 20

$$R = aud_{mono} \times \alpha_d \times \alpha_{or}$$

onde aud_{mono} corresponde ao vector do ficheiro áudio mono.

Como era de esperar, esta implementação não conduziu a resultados muito realistas, no entanto, a sua implementação foi fulcral para avaliar inicialmente a integração de todas as componentes do projecto. Apesar da sua falta de realismo, era muito fácil identificar a origem das fontes sonoras.

6.2. Auralização utilizando o simulador acústico

Com o objectivo de tornar o sistema o mais parecido com a realidade possível, optou-se por modificar o código de um simulador acústico que tinha sido previamente desenvolvido num projecto anteriormente realizado no DETI (ALBUQUERQUE et al., 2008). Este simulador, consegue calcular as atenuações e reflexões sofridas por uma onda acústica numa sala com determinadas características, de maneira a determinar com o máximo realismo qual seria o sinal recebido num determinado ponto. Devido a limitações em termos de tempo de processamento, este simulador apenas não tem em conta os seguintes aspectos:

- Difracção;
- Dispersão de reflexões nas superfícies;
- Modelação de superfícies cilíndricas;
- Refracção do som causado por gradientes de temperatura;
- Efeito do vento.

Desta maneira, o trabalho a realizar nesta área passaria por utilizar o simulador para calcular a onda acústica recebida num determinado ponto e direcção, realizando posteriormente a filtragem do sinal utilizando bases de dados de HRTF. A base de dados utilizada consistiu na base de dados CIPIC (ENGINEERING, 2011), dado que é das bases de dados mais completas disponível para download. Esta inclui medições para 45 sujeitos diferentes, incluindo o manequim KEMAR, cada um com mais de 2500 medições efectuadas, com um total de 25 valores de azimuth e 50

de elevação. Segundo a documentação que acompanha a base de dados, os valores de azimuth da mesma estão localizados entre -45 e 45 graus, com espaçamento de 5 graus. Foram ainda calculados os valores fixos de azimuth para os ângulos ± 80 , ± 65 e ± 55 graus. Relativamente à elevação, regista-se uma gama que varia entre os -45 e os 230.65 graus, com incrementos de 5.625 graus.

Após a realização de alguns testes iniciais com o simulador verificou-se que o tempo que a simulação da propagação da onda acústica era muito demorada e como tal, incompatível com a solução em tempo real que se pretendia realizar. Apesar disso, um dos desafios propostos nesta abordagem consistiu em colocar o simulador a funcionar com o máximo realismo possível. Desta maneira, optou-se por realizar a interpolação dos valores disponibilizados pelas bases de dados. Foi então feita uma função que interpola a base de dados lida e grava a interpolada num novo ficheiro. Nesta função é possível escolher a taxa de interpolação (que tem de corresponder a um número inteiro) bem como o tipo de interpolação a utilizar, nomeadamente (segundo a nomenclatura do MATLAB):

- *Nearest* - Aproxima o valor interpolado para o existente que lhe é mais próximo;
- *Linear* - Realiza interpolação linear
- *Spline* - Realiza interpolação do tipo "*spline*"

A Interpolação realizada foi bidimensional e consequentemente realizada simultaneamente para os valores de azimuth e elevação, utilizando para isso funções dedicadas a isso já incluídas nas bibliotecas do MATLAB. Os resultados obtidos da interpolação das respostas a impulso das HRTF para as três técnicas podem ser observados nos seguintes gráficos, onde se escolheu, por exemplo, 10 graus de azimuth e 10 graus de elevação:

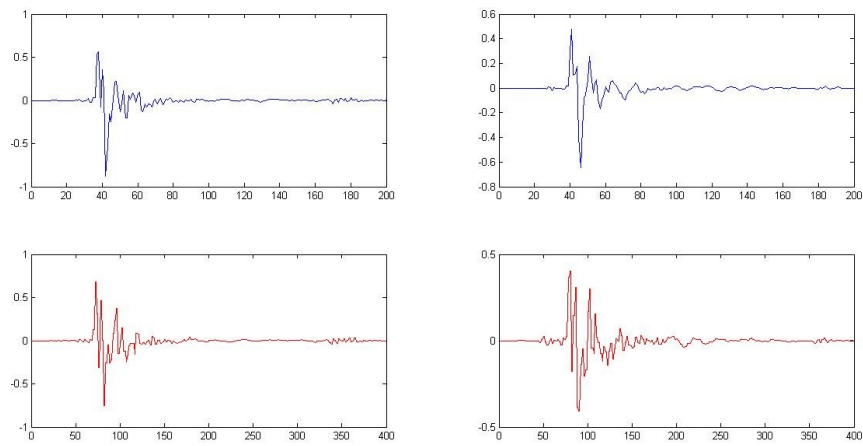


Figura 48 - Em cima: Resposta a impulso para os canais esquerdo e direito com 10º de azimuth e 10º de elevação.
Em baixo : Resposta a impulso para os canais esquerdo e direito com 10º de azimuth e 10º de elevação utilizando
interpolação do tipo "nearest" para o dobro dos pontos

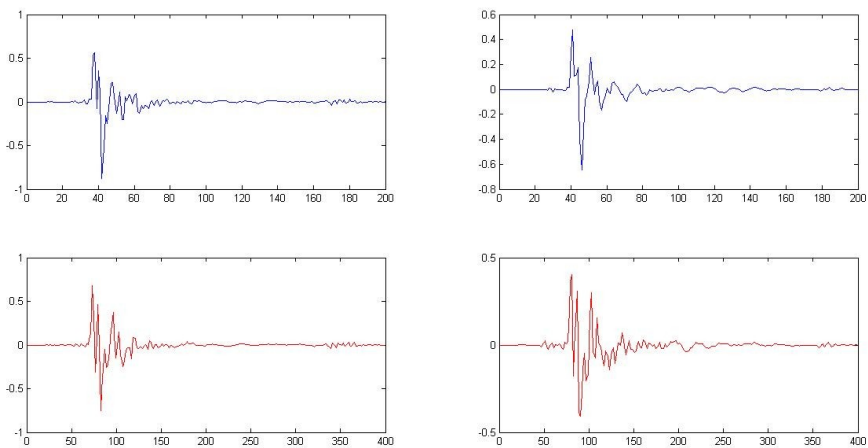


Figura 49 - Em cima: Resposta a impulso para os canais esquerdo e direito com 10º de azimuth e 10º de elevação.
Em baixo : Resposta a impulso para os canais esquerdo e direito com 10º de azimuth e 10º de elevação utilizando
interpolação do tipo "linear" para o dobro dos pontos.

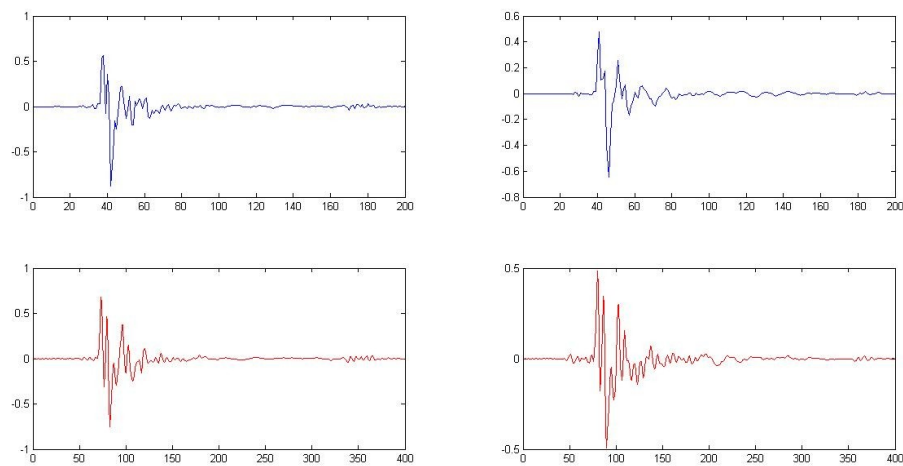


Figura 50 - Em cima: Resposta a impulso para os canais esquerdo e direito com 10° de azimuth e 10° de elevação. Em baixo : Resposta a impulso para os canais esquerdo e direito com 10° de azimuth e 10° de elevação utilizando interpolação do tipo "spline" para o dobro dos pontos.

Na análise dos resultados conclui-se que efectivamente a sensação de realismo é bastante maior comparativamente com a situação anterior. No entanto, o grande tempo dispendido no processamento do simulador torna impossível a sua implementação no projecto em questão. De notar que este simulador quando foi construído, o objectivo principal não consistia em utilizá-lo em tempo real, mas sim obter a melhor representação possível da influência de diversos factores na propagação de ondas sonoras.

6.3. Auralização utilizando HRTF

A última abordagem que foi feita relativamente à auralização consistiu na utilização de filtragem dos sinais áudio utilizando para isso as bases de dados de HRTF disponíveis para download (<http://sound.media.mit.edu/resources/KEMAR.html>). Estas bases de dados foram adquiridas na câmara anecóica do MIT, onde foram medidas as respostas a impulso de um altifalante colocado a 1.4 metros de manequim KEMAR com microfones colocados nos seus ouvidos. Foram efectuadas diversas medições, um total de 710, com elevações entre os -40 e os 90 graus. No entanto, para este trabalho em específico optou-se por utilizar apenas as bases de dados com elevação de 0° e com variações de azimuth entre os 0° e 360°, dado que em termos de posicionamento das fontes sonoras, não se considera a altitude da mesma. A razão pela qual se optou utilizar esta base de dados em detrimento da base de dados utilizada para o simulador

acústico deveu-se ao facto de os valores de azimuth da base de dados anteriormente utilizada não serem separados uniformemente. Assim, certos valores de azimuth apenas poderiam ser alcançados com a precisão desejada caso se realizasse interpolação. Apesar de esta técnica ter sido experimentada, na prática o realismo da utilização de HRTF que apresentem valores que foram efectivamente medidos ou interpolados é notória. Para além disso, a base de dados do MIT tem os seus ficheiros separados por elevação, ângulo e canal (esquerdo ou direito), o que faria com que a abertura do ficheiro no MATLAB fosse feita mais rapidamente e facilmente, ao invés das bases de dados do CIPIC, que tinham toda a informação num único ficheiro.

O programa escrito começa então pela identificação do ângulo entre o utilizador e a fonte sonora. Para cálculo deste ângulo utiliza-se um raciocínio semelhante ao que foi utilizado no ponto 6.1. Após obtenção deste ângulo, torna-se necessário identificar quais os ficheiros de resposta a impulso a utilizar para o canal esquerdo e direito. Dado que as bases de dados disponíveis apenas têm aquisições com intervalos de 5 graus, para valores de ângulos que não fossem múltiplos de 5, procurou-se utilizar o valor que lhe estivesse mais próximo. Nesta situação, o maior erro cometido seria de 2.5 graus, valor que não teria qualquer influência no resultado final caso se procurasse a sua correcção. Após a identificação do ficheiro a resposta a impulso adequado, procede-se à filtragem do sinal áudio *mono* pelos ficheiros das HRTF de maneira a obter um sinal estéreo, com auralização adequada ao canal auditivo esquerdo e direito.

Este tipo de abordagem acabou por se revelar a ideal, dado que apresenta um realismo bastante superior face ao primeiro método adoptado (diferenças de volume), nomeadamente na identificação dos sons dianteiros e traseiros. Para além disto, a auralização utilizando HRTF apresentava um tempo de processamento semelhante à primeira escolha e consequentemente muito menor que o do simulador acústico. Como tal, na versão de demonstração final do sistema optou-se por utilizar apenas esta opção.

7. Testes

Após a realização do trabalho, utilizaram-se duas maneiras de avaliar os resultados obtidos. A primeira maneira utilizada consistiu na aquisição de bastantes valores de maneira a que se pudessem estimar indicadores como a média ou o desvio padrão dos valores registados pela localização espacial. Para a orientação da cabeça não foi feita qualquer medição, dado que o erro obtido corresponderia ao que se encontrava referido na documentação do produto. Porém, a avaliação da componente da interacção entre o utilizador e o sistema desenvolvido não podia ser avaliada desta maneira. Assim, optou-se por realizar uma sessão de testes com o sistema desenvolvido de maneira a avaliar melhor as opiniões e registar a experiência vivida pela utilização do sistema por indivíduos que não se encontram familiarizados com o comportamento do sistema.

Antes da realização destes programas optou-se por melhorar o máximo possível a "performance" do código desenvolvido. Desta maneira, tirou-se partido da função "*profile*" do MATLAB que permite a análise de código, indicando as funções que mais recursos computacionais consomem. Foram então efectuadas 100 aquisições de dados sucessivas e registados os tempos gastos na execução de cada função. Os resultados obtidos encontram-se em anexo, na secção 10.2. Através da análise aos mesmos, foi possível verificar que dentro do ciclo que efectua sucessivamente a emissão, aquisição e tratamento de dados, existem duas funções que se destacam das outras pelo tempo que a sua execução demora. Essas funções consistem nas funções que se encontram nas linhas de código 145 e 154, ou seja, as funções `wait([ai ao],10)` e `out=filter(xchrp,1,rx)` respectivamente. Quanto à primeira função não havia nenhum melhoramento que fosse possível implementar, dado que corresponde a uma função que espera que a aquisição dos sinais ligados à placa Data Translation seja efectuada correctamente. Pelo contrário, a segunda função corresponde à que realiza a correlação cruzada entre o sinal original e o sinal recebido, de maneira a obter o tempo de voo do sinal. Esta função encontrava-se a filtrar todos os sinais da variável de entrada, incluindo o sinal do farol que apenas está encarregue de realizar emissão do sinal (estação móvel). Este cálculo não se torna necessário realizar, visto que se sabe que a distância da estação móvel a si própria será obviamente zero e esse valor poderá ser forçado posteriormente. Assim, optou-se por remover o cálculo desta componente, o que resultou numa melhoria significativa, obtendo-se uma diminuição de 0.09 s por cada ciclo efectuado. No âmbito desta análise procurou-se ainda tentar perceber qual o tempo demorado para o refrescamento da imagem do mapa com a posição do

utilizador e das fontes sonoras. Verificou-se então, que em média o tempo por ciclo utilizado para este processamento é de aproximadamente 0.22 s, valor bastante significativo. Em suma, as melhorias efectuadas no código permitiram obter em média uma diminuição do tempo de cada ciclo de 0.86 s para 0.79 s com apresentação do mapa da sala em tempo real e de 0.64 s para 0.56 s sem apresentação do mapa. Para esta melhoria, contribuíram ainda pequenas alterações efectuadas em algumas das funções criadas que são chamadas no programa principal.

7.1. Avaliação objectiva - Testes de precisão da localização

Os testes de precisão da localização foram feitos através da análise de várias medidas. Assim, foi colocado o emissor móvel num local pré-definido, com as coordenadas conhecidas e foram efectuadas 100 medidas para três posições diferentes (Figura 51).

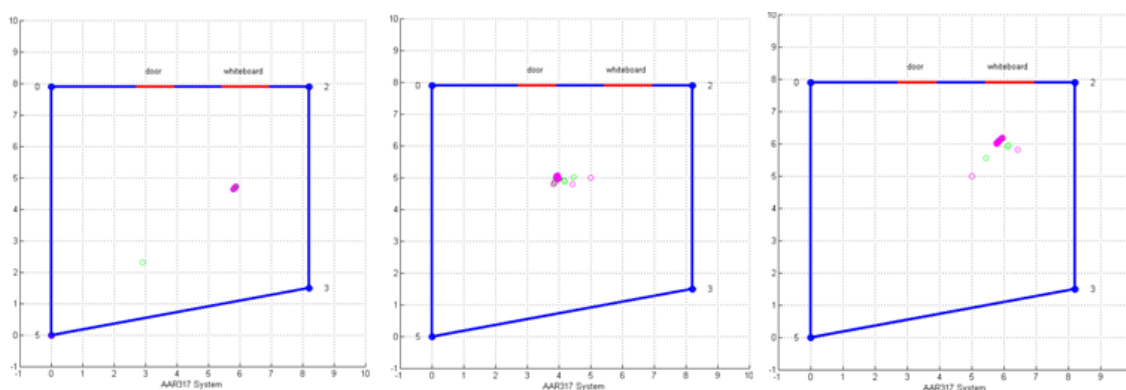


Figura 51 - Resultados obtidos para 100 medidas em três posições diferentes. Verde - posição instantânea. Magenta - posição filtrada

Para todas as posições, obteve-se um valor médio de desvio padrão de 0.043 m para o eixo x e 0.033 m para o eixo y. Estes resultados foram obtidos em condições ideais, onde não existiam nenhuns obstáculos entre o emissor e os receptores fixos nas paredes e com a sala com ruído ambiente relativamente baixo. O emissor móvel foi colocado fixo, num tripé, a 1,7m de altura, valor para a qual o sistema se encontrava perfeitamente calibrado.

Optou-se ainda por observar o comportamento do sistema com a existência de ruído. Verificou-se que quando o ruído envolvia sinais na gama dos ultra-sons, tais como um assobio, o sinal

recebido era muito ruidoso e a descodificação da posição apresentava erros muito grandes. Por outro lado, sem este tipo de interferências, ou seja, com ruído ambiente habitual, como por exemplo, pessoas a falar na sala, verifica-se que a interferência na precisão é nula.

7.2. Avaliação subjectiva - Testes com voluntários

De maneira a realizar estes testes, foram feitos três programas com o objectivo de registar os resultados obtidos com facilidade durante a realização do teste, e sua posterior análise. Os três programas criados foram então:

- *AAR317 Orientation;*
- *AAR317 Position;*
- *AAR317 Navigation.*

O primeiro programa, tal como o nome indica, pretende avaliar a precisão com que o utilizador consegue indicar a direcção de um som emitido virtualmente. Desta maneira, após se ter escolhido uma localização para a fonte sonora, deve-se pedir ao sujeito que se encontra a realizar o teste que a sua cabeça aponte com a máxima precisão possível para o local onde acha que o som está a ser reproduzido, nunca variando a sua posição espacial. O programa apresenta então como variável de saída a diferença do ângulo entre o local para onde o utilizador se encontra a olhar e o local onde efectivamente a fonte sonora se encontra. Para a realização deste teste serão realizados três ensaios, cada um com um som diferente.

O programa *AAR317 Position* tem como objectivo o cálculo da distância entre o utilizador e a fonte sonora. Assim, neste teste, é pedido ao utilizador que se desloque pela sala até que se encontre no local onde pense que é mais provável a fonte sonora se encontrar e virar-se para ela.

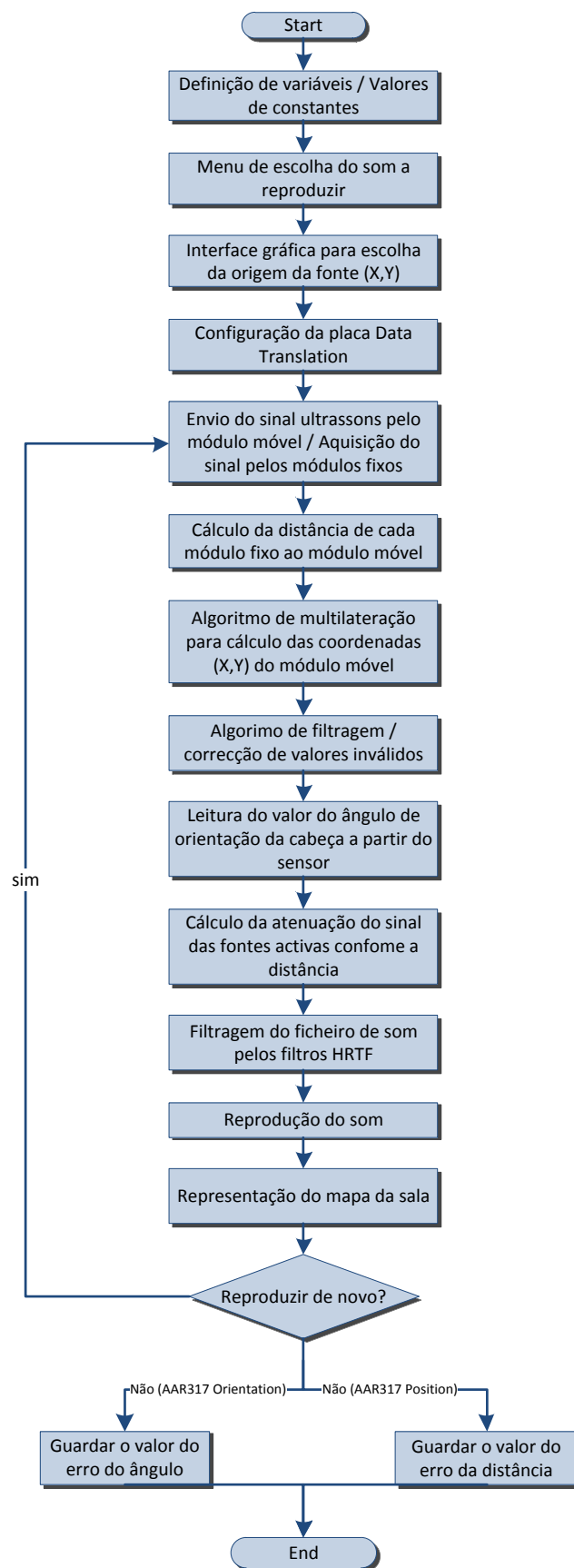


Figura 52 - Diagrama de blocos para os programas AAR317 Orientation e AAR317 Position

Por fim, o último programa trata-se daquele que se aproxima mais ao objectivo de realidade virtual inicialmente definido. O *AAR317 Navigation* consiste num programa onde se podem colocar uma ou mais fontes sonoras virtuais pela sala, cada uma com o som e posição à escolha. Desta maneira, tenta-se recriar o cenário inicialmente previsto de integração deste sistema num ambiente de, como por exemplo, um museu. Neste programa optou-se por introduzir algumas alterações na atenuação do som com a distância ao mesmo, visto que se pretendia distinguir mais facilmente a origem de cada fonte sonora, evitando a simultaneidade de muitos sons. Para além disso, considerando novamente o contexto do museu, a ideia consistiria em colocar os sons em reprodução quando um utilizador se aproximava de uma obra de arte e não ouvir todos os sons numa sala. Assim, definiu-se que a atenuação baseada com a distância teria um comportamento linear decrescente com a distância até 3 metros. A partir deste valor, o som deixará de ser ouvido. A Equação 21 define a atenuação utilizada.

Equação 21

$$\begin{cases} \alpha_d = -\frac{d}{3} + 1 & \text{para } d < 3 \\ \alpha_d = 0 & \text{para } d \geq 3 \end{cases}$$

Neste último teste, não se efectuou qualquer medida física, optando-se por realizar um questionário a cada voluntário no final do teste, perguntando-lhe a sua opinião acerca da experiência. As perguntas efectuadas podem ser encontradas em anexo, na Secção 10.1.

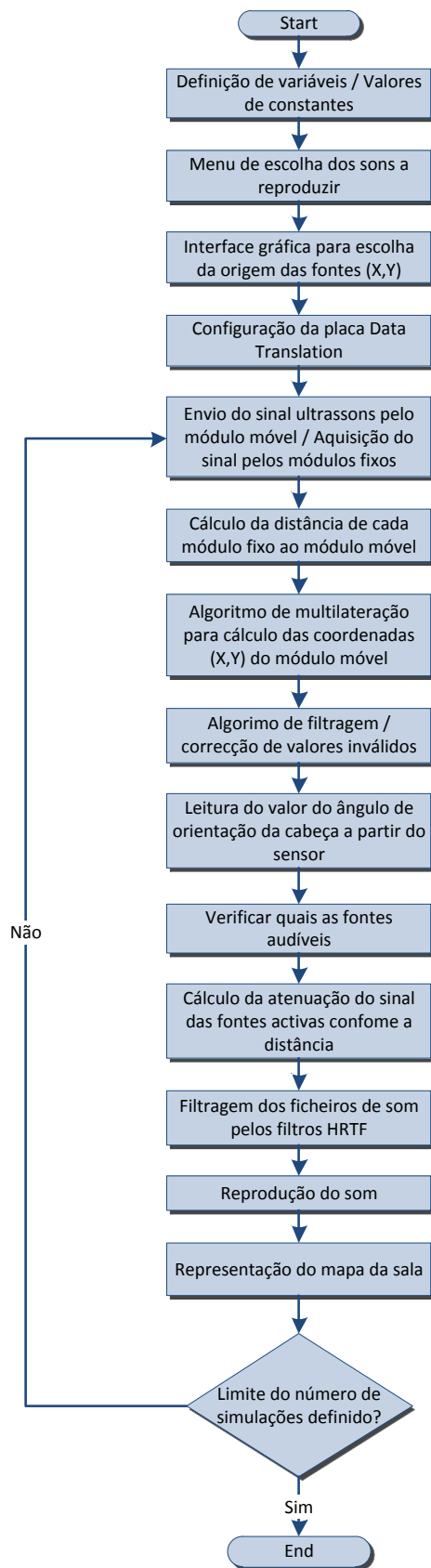


Figura 53 - Diagrama de blocos para os programas AAR317 Navigation

De seguida proceder-se-á à análise dos dados e das respostas obtidas em cada experiência. Todos os testes foram efectuados com 7 voluntários, que fizeram os três testes de seguida explicitados.

7.2.1. Resultados do teste do programa AAR317 Orientation

Neste teste, a fonte foi colocada a uma distância de 1m do utilizador e este, sem se mover do ponto onde inicialmente se localizava, teria de orientar a sua cabeça na direcção onde achava que o som estava a ser reproduzido. A mesma experiência foi repetida por três vezes, de maneira a obter uma média do erro registado. Os resultados obtidos estão representados na Tabela 9 e a Figura 54 indicam a média do erro do ângulo de orientação registado por cada voluntário.

Nome	Erro teste 1 (graus)	Erro teste 2 (graus)	Erro teste 3 (graus)	Módulo teste 1 (graus)	Módulo teste 2 (graus)	Módulo teste 3 (graus)	Média todos (graus)	Altura (m)
Ana	-4,00	1,75	4,47	4,00	1,75	4,47	3,41	1,65
Hugo	-6,77	0,13	-2,51	6,77	0,13	2,51	3,13	1,67
Daniel	-3,65	-11,56	-15,36	3,65	11,56	15,36	10,19	1,87
Sérgio	-10,96	-1,94	-10,74	10,96	1,94	10,74	7,88	1,84
Ricardo	-7,16	-0,82	-8,56	7,16	0,82	8,56	5,51	1,69
Diogo	4,22	1,23	3,61	4,22	1,23	3,61	3,02	1,71
José	0,32	0,07	10,12	0,32	0,07	10,12	3,50	1,80
Média	-4,00	-1,59	-2,71	5,30	2,50	7,91	5,24	1,75

Tabela 9 - Resultados obtidos do teste do programa AAR317 Orientation

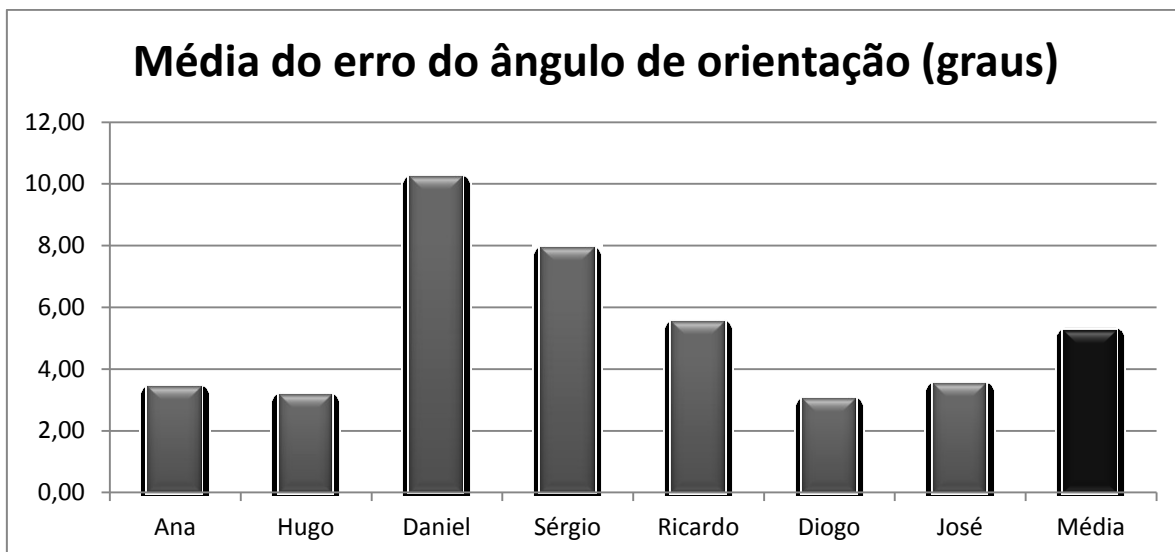


Figura 54 - Resultados obtidos do teste do programa AAR317 Orientation

Analisando os valores obtidos, consegue-se verificar que o erro médio máximo registado foi de 10,19 graus e o erro mínimo foi de 3,02 graus. O valor médio do erro foi de 5,24 graus. Fazendo uma primeira análise, seria de esperar que o valor do erro fosse menor e que se aproximasse mais do valor do erro apresentado pelo sensor de orientação (1 grau). Existe no entanto uma outra limitação que se encontra a majorar este erro que consiste na base de dados de HRTF utilizada. Esta apresenta incrementos de 5 graus e como tal, o erro máximo que o utilizador poderá cometer será de metade deste valor, ou seja, 2,5 graus. Considerando que, em termos de orientação da cabeça este valor é extremamente pequeno, pode-se considerar que a média do erro obtido apresentou num valor bastante positivo e que todos os utilizadores conseguiram identificar com grande precisão a origem das fontes.

7.2.2. Resultados do teste do programa AAR317 Position

O segundo teste consistiu em colocar uma fonte num local que o utilizador desconhecesse e este tivesse de se deslocar até este achar que se encontrava à mínima distância possível da mesma. Os resultados obtidos durante a experiência encontram-se explicitados na Tabela 10 e na Figura 55.

Nome	Teste 1 - Erro distância (m)	Teste 2 - Erro distância (m)	Média erro distância (m)	Altura (m)
Ana	0,27	0,29	0,28	1,65
Hugo	0,29	0,07	0,18	1,67
Daniel	0,58	0,13	0,36	1,87
Sérgio	0,07	0,32	0,20	1,84
Ricardo	0,08	0,19	0,13	1,69
Diogo	0,07	0,18	0,12	1,71
José	0,24	0,14	0,19	1,80
Média	0,23	0,19	0,21	1,75

Tabela 10 - Resultados obtidos do teste do programa AAR317 Position

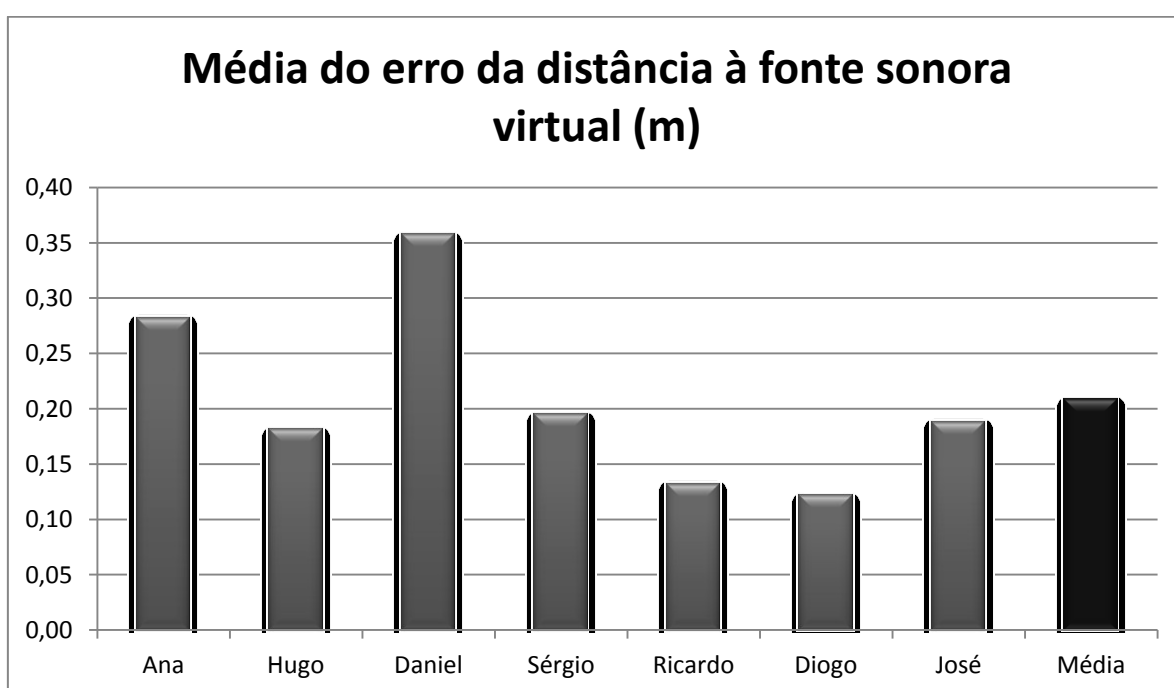


Figura 55 - Resultados obtidos do teste do programa AAR317 Position

Fazendo a análise aos dados obtidos, consegue-se verificar que o erro médio máximo obtido foi de 36cm, o erro mínimo foi de 12 cm e o erro médio foi de 21 cm. Estes resultados são bastante convincentes dado que o erro em valor absoluto foi bastante pequeno. Para além disso, considerando o erro adjacente ao sistema de localização, que apresenta o valor entre 3 a 5 cm para cada eixo, verifica-se que estes resultados relevaram que todos os voluntários conseguiram localizar a origem da fonte com uma grande precisão.

Para além dos valores de distância entre o utilizador e a fonte sonora que foram registados durante a experiência, optou-se também por registar qual a altura de cada voluntário. A ideia consistiria em verificar se existia alguma influência entre a altura e a precisão da localização, visto que o sistema se encontra calibrado para um utilizador que tivesse 1.7m de altura. Dessa análise foi possível obter a Figura 56.

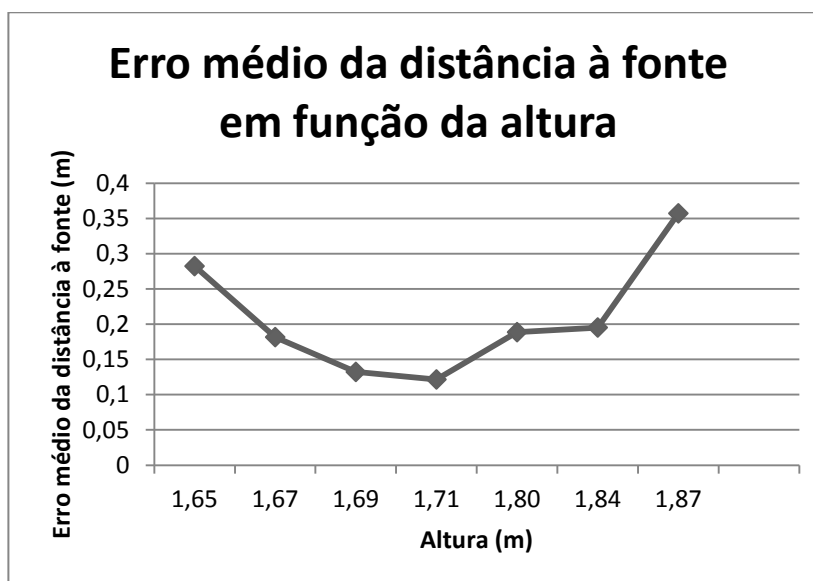
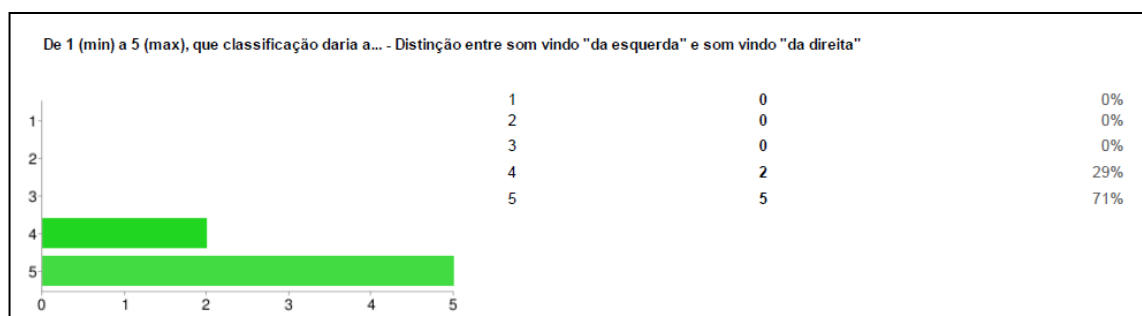
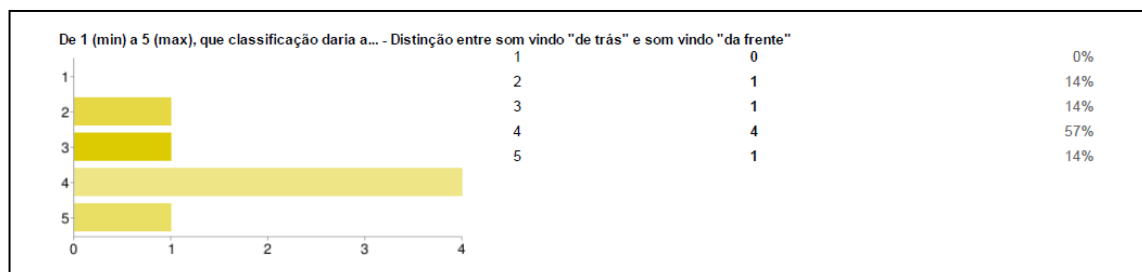
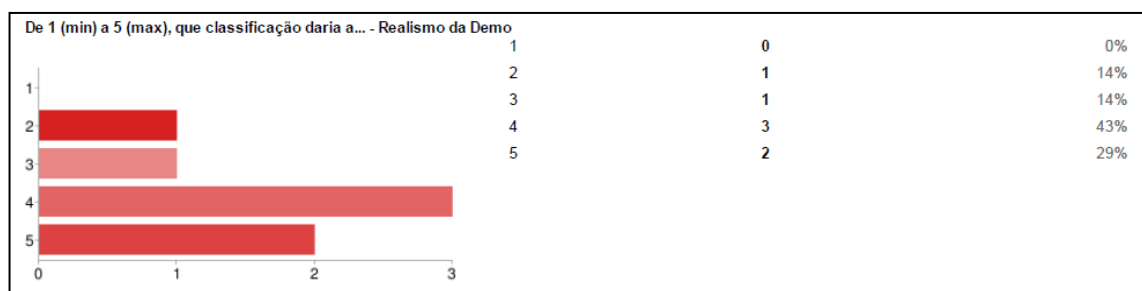
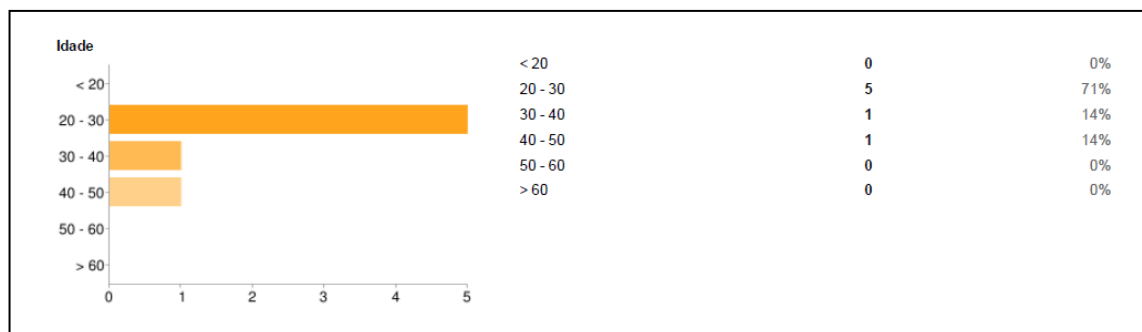
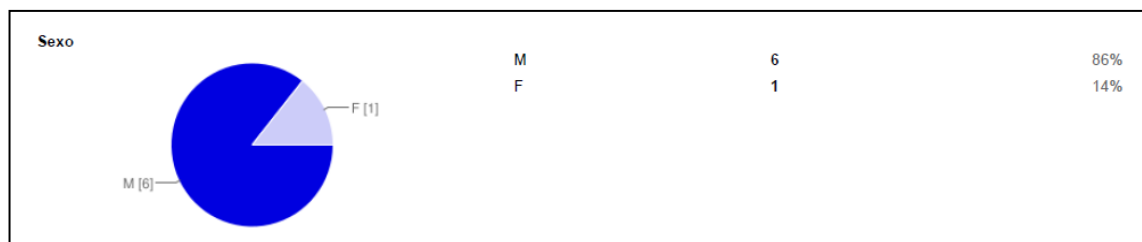


Figura 56 - Erro médio da distância à fonte em função da altura

É possível constatar que efectivamente existe uma relação entre a altura do utilizador e a sua capacidade de localizar, visto que o ponto mínimo de erro se localiza a uma altura próxima da altura de calibração do sistema. À medida que o módulo da altura se distancia do valor de calibração verifica-se que o erro da distância à fonte também aumenta.

7.2.3. Resultados do teste do programa AAR317 Navigation

Tal como já foi referido anteriormente, neste teste optou-se por não registar quaisquer dados técnicos, mas sim submeter o utilizador a uma experiência virtualmente mais imersiva e registar as suas opiniões, tendo em conta as melhorias a realizar num trabalho futuro. As respostas ao questionário efectuado encontram-se representadas na Figura 57. Para realização do questionário e tratamento estatístico foi utilizado o *software* Google Docs.



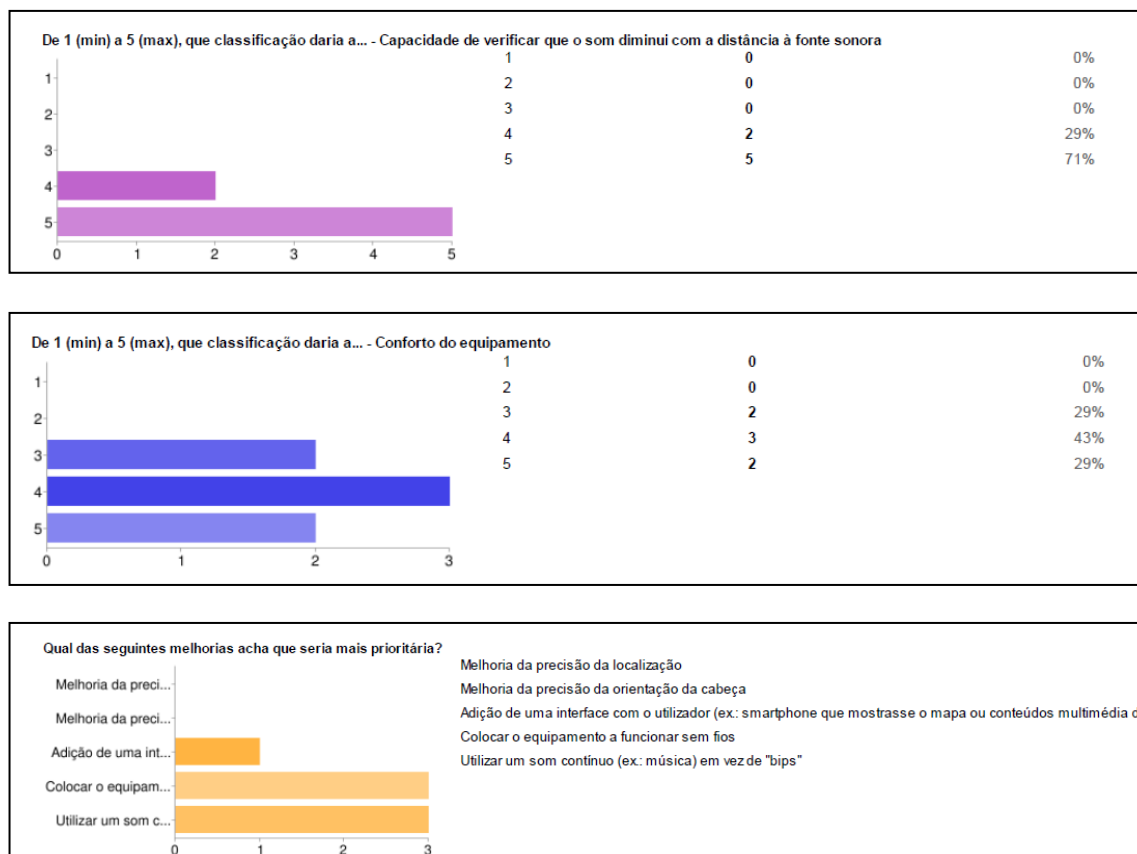


Figura 57 - Respostas obtidas às principais perguntas do questionário

Da análise das respostas é possível constatar os seguintes factos:

- O realismo do protótipo neste momento não é muito elevado, mas ainda assim, tendo em conta que o sistema apresentado consiste num protótipo, as respostas obtidas deixaram bons indicadores;
- Foi muito fácil aos utilizadores distinguir quando um som estava à sua esquerda ou à sua direita. Por outro lado, como seria de esperar, verificou-se que houve mais dificuldades na identificação de um som vindo "da frente" e um som vindo "de trás". Constatou-se também que os utilizadores do sistema AAR317 tiveram facilidade em verificar a atenuação do som quando se afastam da fonte sonora virtual;
- O "conforto do equipamento" registou uma pontuação razoável, tendo em conta que o sistema construído se preocupou minimamente com este detalhe. O facto de existirem fios que estabelecem a comunicação entre o dispositivo móvel e a unidade de

processamento terá contribuído para a menor sensação de conforto por parte do utilizador;

- As melhorias que os utilizadores do sistema acharam ser mais fulcrais consistiram na melhoria do sistema para que este funcionasse sem fios e a utilização de um som contínuo ao invés de ficheiros sonoros de curta duração.



Figura 58 - Fotografia de um utilizador durante a sessão de testes

8. Conclusões e trabalho futuro

Cumpriu-se o objectivo inicialmente definido de construir um protótipo de demonstração de um sistema de realidade aumentada áudio. Naturalmente, este protótipo apresenta algumas limitações comparativamente com o sistema que se poderia classificar de 'ideal'. No entanto, estas diferenças residem mais a nível técnico do que conceptual, o que permitiu avaliar a viabilidade do projecto e validar as decisões tomadas. Os testes realizados indicaram um funcionamento correcto de todos os componentes do sistema, quer ao nível de localização do ouvinte e detecção da orientação da cabeça, quer ao nível da auralização propriamente dita.

Destaca-se o desempenho do sistema de localização, dado que foi construído de raiz, quer a nível de *hardware*, quer a nível de *software*. O erro na detecção da posição do utilizador pode considerar-se praticamente insignificante para a aplicação em causa.

Relativamente ao sistema de Auralização, os testes subjectivos indicaram bastante facilidade dos utilizadores em localizar a origem das fontes sonoras, quer a nível de distância quer a nível de azimuth.

Esta constituiu a primeira fase da implementação do sistema de Realidade Aumentada Áudio para o projecto "Pervasive Tourism"; podem apontar-se diversos melhoramentos possíveis tendo em conta o objectivo final. Entre os mais prioritários conta-se a necessidade de fazer o sistema de localização funcionar sem fios. A solução já foi apontada na Secção 3.1.1 e consiste em implementar um mecanismo que sincronize o sinal emitido pelo emissor com o recebido pelos receptores, de maneira a que se consiga calcular o tempo de voo correctamente. Deve ser possível também reproduzir sons de maior duração. Relativamente a este aspecto, o problema está relacionado com o facto de o programa implementado ser sequencial, ou seja, enquanto o som está a ser gerado e reproduzido, os restantes processos encontram-se suspensos, dependentes da finalização deste. Como tal, quanto maior for a duração do ficheiro de som, maior o tempo que o programa irá estar sem actualizar a informação de posição e orientação da cabeça do ouvinte. A solução deverá passar por efectuar o processamento dos sistemas de localização e orientação paralelamente com o programa de geração e reprodução do áudio. Deverá também tornar-se possível, durante a emissão de sons longos, variar dinamicamente o seu processamento em função de variações na localização e orientação do utilizador.

O desenvolvimento de um sistema de orientação proprietário, não baseado numa solução comercial, é perfeitamente possível e poderá conduzir a um sistema final de custo bastante inferior, para além de mais versátil.

Por fim, sugere-se a integração de um *smartphone* neste sistema de Realidade Aumentada Áudio, no sentido de tornar o sistema final mais orientado para o utilizador.

9. Bibliografia

ALBUQUERQUE, D.; VIEIRA, J.; BASTOS, C. - Room Acoustics Simulator for Ultrasonic Robot Location. Revista do Deti. (2008).

ANALOG DEVICES - The Five Motion Senses: Using MEMS Inertial Sensing to Transform Applications. (2009).

APPLE - Apple Developer. de Disponível em: <<http://developer.apple.com/>>.

Arcada University of Applied Life -. de 2011]. Disponível em: <<http://www.sit.fi/~grahn/fortmod/Image652.gif>>.

Augmented Planet -. de 2011]. Disponível em: <<http://www.augmentedplanet.com/wp-content/uploads/2009/12/toozla.jpg>>.

AZUMA, R.T. - A survey of augmented reality. Presence-Teleoperators and Virtual Environments. ISSN 1054-7460. Vol. 6, n.º 4 (1997), p. 355-385.

CASALEIRO, RICARDO JOSÉ DA SILVA CORREIA - Sala de espectáculos virtual. Aveiro: R. Casaleiro, 2008.

DAVIS, UNIVERSITY OF CALIFORNIA - Spatial Sound Research. de 2011]. Disponível em: <<http://interface.cipic.ucdavis.edu/sound/research.html>>.

EKAHAU - Comparison of Wireless Indoor Positioning Technologies. (2005).

ENGINEERING, UNIVERSITY OF CALIFORNIA DAVIS - DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER - The CIPIC HRTF Database. de Disponível em: <<http://interface.cipic.ucdavis.edu/sound/hrtf.html>>.

GREENEMEIER, LARRY - A Positioning System That Goes Where GPS Can't. [12 de Março de 2011]. Disponível em: <<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=indoor-positioning-system>>.

HAYKIN, SIMON S. - Communication systems. 5th. Hoboken, NJ: Wiley, 2009. ISBN 9780471697909.

HEADINGS, NATIONAL LIBRARY OF MEDICINE - MEDICAL SUBJECT - Ear, Middle. [2011 de 2011]. Disponível em: <http://www.nlm.nih.gov/cgi/mesh/2011/MB_cgi?mode=&term=Middle+ear>.

How Stuff Works -. de 2011]. Disponível em: <<http://static.howstuffworks.com/gif/vr-gear-8.jpg>>.

INSTRUMENTS, TEXAS - eZ430-RF2500 Development Tool User's Guide. (2007).

KING, AD - Inertial navigation-forty years of evolution. GEC review. Vol. 13, n.º 3 (1998), p. 140-149.

LOPES, SÉRGIO IVAN FERNANDES - Localização de obstáculos para invisuais utilizando ultra-sons e técnicas de espacialização auditiva. Aveiro: S. Lopes, 2009.

LOPES, SÉRGIO IVAN; VIEIRA, JOSÉ; ALBUQUERQUE, DANIEL - ALOC317: Acoustic Location System. (2011).

SoundDelta: A Study of Audio Augmented Reality Using WiFi-Distributed Ambisonic Cell Rendering. City

PK GMZ .:The Blog -. de 2011]. Disponível em:
<<http://pakogom.wordpress.com/2008/06/17/iphone-3g-llega-a-espana-el-11-de-julio/>>.

2005, Parallel worlds: immersion in location-based experiences. City: ACM, 2005. 1733-1736 p.

ROZIER, J.; KARAHALIOS, K.; DONATH, J. - Hear&There: An Augmented Reality System of Linked Audio'Online Proceedings of the International Conference on Auditory Display. Available at< [u](http://www.icad.org/websiteV2.0/Conferences)>
<http://www.icad.org/websiteV2.0/Conferences></u>. (2000).

SÁ, FLÁVIO MARTINS DIAS DE - Sistema de localização e identificação por ultra-sons para museus. Aveiro: F. Sá, 2008.

SILVA, VÍTOR JOSÉ GONÇALVES DA - Sistema de localização por ultra-sons para museus. Aveiro: V. Silva, 2009.

2008, Localization estimation system using measurement of RSSI based on ZigBee standard. City 2008.

STMICROELECTRONICS - Using LSM303DLH for a tilt compensated electronic compass. [em linha]. (2010). [Consult. Disponível na internet:<URL:http://www.hobbytronics.co.uk/datasheets/Tilt_Compensated_Compass.pdf>].

STMICROELECTRONICS- Web Seminar on ST's MEMS Gyroscopes. 2009. Disponível em WWW:<URL:http://www.st.com/internet/com/MULTIMEDIA_RESOURCES/VIDEO/DEMO_VIDEO/epres_mems_gyroscope.swf>.

TOOZLA -. de 2011]. Disponível em: <<http://toozla.com/>>.

VAZQUEZ-ALVAREZ, Y.; OAKLEY, I.; BREWSTER, S.A. - Auditory display design for exploration in mobile audio-augmented reality. Personal and Ubiquitous Computing. ISSN 1617-4909. (2011), p. 1-13.

VORLÄNDER, MICHAEL - Auralization : fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality. 1st. Berlin: Springer, 2008. ISBN 3540488294 9783540488293.

W.t.t.Future -. de 2011]. Disponível em:
<<http://wtfuture.files.wordpress.com/2011/06/rabokluis-1.jpg>>.

10. Anexos

10.1. Questionário Sessão de Testes

Estas respostas devem ser preenchidas pelo utilizador que testou o sistema. Destinam-se a avaliar a componente mais ligada à interacção entre o sistema e o utilizador.

*Obrigatório

Primeiro Nome
Sexo *
<input type="radio"/> M
<input type="radio"/> F
Idade *
<input type="radio"/> < 20
<input type="radio"/> 20 - 30
<input type="radio"/> 30 - 40
<input type="radio"/> 40 - 50
<input type="radio"/> 50 - 60
<input type="radio"/> > 60

De 1 (min) a 5 (max), que classificação daria a... *

Realismo da Demo

Distinção entre som vindo "de trás" e som vindo "da frente"

Distinção entre som vindo "da esquerda" e som vindo "da direita"

Capacidade de verificar que o som diminui com a distância à fonte sonora

Conforto do equipamento

Qual das seguintes melhorias acha que seria mais prioritária? *

Melhoria da precisão da localização

Melhoria da precisão da orientação da cabeça

Adição de uma interface com o utilizador (ex.: smartphone que mostrasse o mapa ou conteúdos multimédia dependendo da posição)

Colocar o equipamento a funcionar sem fios

Utilizar um som contínuo (ex.: música) em vez de "bips"

10.2. Análise performance programa

10.2.1. Sem melhorias no código - relatório gerado pelo MATLAB

Lines where the most time was spent

Line Number	Code	Calls	Total Time	% Time	Time Plot
156	out=filter(xchrp,1,rx);	100	41.130 s	46.5%	
147	wait([ai ao],10); % 10 segundo...	100	11.397 s	12.9%	
87	ai = analoginput('dtol',0);	1	10.860 s	12.3%	
172	[indexs,amplis] = findPeaks(e...	100	5.707 s	6.4%	
218	sound(HRTFprocess2D(data(:,1)'...	100	3.861 s	4.4%	
All other lines			15.538 s	17.6%	
Totals			88.493 s	100%	

10.2.2. Com melhorias no código - relatório gerado pelo MATLAB

Lines where the most time was spent

Line Number	Code	Calls	Total Time	% Time	Time Plot
154	out=filter(xchrp,1,rx);	100	32.074 s	36.1%	
145	wait([ai ao],10); % 10 segundo...	100	11.251 s	12.7%	
87	ai = analoginput('dtol',0);	1	10.328 s	11.6%	
7	snd = input('Please choose the...')	1	10.000 s	11.3%	
170	[indexs,amplis] = findPeaks(e...	100	5.422 s	6.1%	
All other lines			19.723 s	22.2%	
Totals			88.799 s	100%	

10.3. Transferência de dados para o LSM303DLH através de I²C

Table 11. Transfer when master is writing one byte to slave

Master	ST	SAD + W		SUB		DATA		SP
Slave			SAK		SAK		SAK	

Table 12. Transfer when master is writing multiple bytes to slave

Master	ST	SAD + W		SUB		DATA		DATA		SP
Slave			SAK		SAK		SAK		SAK	

Table 13. Transfer when master is receiving (reading) one byte of data from slave

Master	ST	SAD + W		SUB		SR	SAD + R			NMAK	SP
Slave			SAK		SAK			SAK	DATA		